Ein selbsttätig regelnder Transformator für konstante Spannung

von

Hans Beck

Vorgelegt als

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Johann-Wolfgang-Goethe-Universität
zu Frankfurt am Main
A. D. 1938

Frankfurt a. M.
1939

1. Referent: Prof. Dr. B. Rajewsky
2. Referent: Prof. Dr. M. Seddig

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juni 1938

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsverzeichnis.

		Seite
1.	Die Aufgabe der Arbeit	5
2.	Methoden der Spannungsregelung	6
3.	Grundsätzliche Wirkungsweise des neuen Transformators	9
4.	Die Flußverhältnisse im Transformator	10
5.	Der Flußverteilungsfaktor und die Gleichung des Regelvorganges	13
6.	Betrachtungen über die günstigste Flußverteilung	16
7.	Die Durchflutung und der Magnetisierungsstrom	20
8.	Die magnetische Widerstandsvariierung und die Regelvorgangsgleichung	21
9.	Die selbsttätige Regelung des Transformators	24
10.	Messungen an einem Versuchstransformator	30
11.	Der selbsttätig regelnde Transformator und seine praktische Brauchbarkeit	37
12.	Ein Transformator mit einer verbesserten selbsttätigen Regelung	40
13.	Messungen an diesem Transformator	44
	Zusammenfassung	51
	Schrifttum	53

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546401_0136

1. Die Aufgabe der Arbeit.

Die Frage der Spannungskonstanz ist für viele experimentelle Untersuchungen und für viele Fälle der praktischen Elektrotechnik von großer Bedeutung. Wenn eine konstante Spannungsquelle benötigt wird, kann man die von den Netzen gelieferte Spannung nur unter Anwendung besonderer Vorsichtsmaßnahmen benutzen, da sie im allgemeinen mehr oder weniger große Schwankungen aufweist. Für Apparaturen, die es gestatten, trotz schwankender Netzspannung während des Betriebes konstante Spannung zu entnehmen, wurden daher die verschiedensten Methoden angegeben [1]—[12]. Die im folgenden beschriebene Apparatur entsprang dem Bedürfnis nach einer geeigneten Gleichstrom-Hochspannungsquelle zum Betrieb von Zählrohren. Diese benötigen zum einwandfreien Arbeiten im allgemeinen eine möglichst konstante Spannungsquelle. Für ihren Betrieb werden meistens Trockenbatterien benutzt. Außer dem Nachteil, daß deren EMK temperaturabhängig ist, haben sie normalerweise beträchtliche Ausmaße und Gewichte und sind kostspielig im Betrieb. Wenn man auf die Verwendung von Batterien verzichten will, so kann man in der Weise verfahren, daß man die Netzspannung auf die erforderliche Höhe transformiert und gleichrichtet. Es besteht dann die Notwendigkeit, ein geeignetes Regelorgan in der Schaltung Transformator-Ventil-Kondensator zu verwenden. Die entwickelte Apparatur liefert konstante Gleichspannung bis zu einigen tausend Volt, und zwar unter Benutzung eines selbsttätig regelnden Transformators. Die vorliegende Arbeit befaßt sich im ersten Teil mit der theoretischen Betrachtung der Wirkungsweise dieses Transformators, während der weitere Teil dessen praktische Durchbildung und die an ihm vorgenommenen Messungen behandelt.

2. Methoden der Spannungsregelung.

Es sollen zunächst einige Möglichkeiten bzw. Verfahren beschrieben werden, die es gestatten, konstante Spannungen zu erzeugen. Prinzipiell lassen sich zwei Methoden unterscheiden:

1. Schaltungen unter Verwendung nicht-linearer elektrischer Widerstände.
2. Schaltungen unter Verwendung nicht-linearer magnetischer Widerstände.

Bei der ersten Methode bedient man sich eines Stromkreises, an dem die schwankende Spannung liegt und der normalerweise aus zwei in Serie geschalteten Widerständen besteht. Mindestens einer der beiden Widerstände hat eine nicht-lineare Charakteristik. Es wird dann durch geeignete Wahl der Charakteristik erreicht, daß ein Widerstand die Spannungsschwankungen aufnimmt, während am zweiten die konstante Spannung abgenommen werden kann. Es bestehen hier wieder zwei Möglichkeiten. Es können Widerstände verwandt werden, deren Strom-Spannungs-Charakteristik innerhalb eines gewissen Bereiches entweder der Strom- oder aber der Spannungs-Koordinate parallel verläuft. Im ersteren Falle liegt dann die konstante Spannung an dem nicht-linearen Widerstand, während im letzteren Falle ein konstanter Strom durch die Anordnung fließt, der an einem linearen Widerstand eine konstante Spannung erzeugt.

Die praktische Verwirklichung dieser Möglichkeiten soll im folgenden kurz betrachtet werden. Eine Anordnung der erstgenannten Art läßt sich beispielsweise herstellen unter Verwendung eines regelbaren Vorschaltwiderstandes, der vor einen Verbraucher geschaltet wird und dessen Widerstand man in der Weise variiert, daß die auftretenden Schwankungen in ihm vernichtet werden. An Stelle eines Vorschaltwiderstandes kann auch ein Potentiometer treten. Bei Wechselspannung läßt sich dieses Prinzip zur praktisch verlustlosen Spannungsregelung an-

wenden, indem man Schiebe- und Spartransformatoren benutzt. In vielen Fällen geschieht die Regelung nicht von Hand, sondern die jeweilige Einstellung wird automatisch unter Verwendung besonderer Steuerorgane vorgenommen. So z. B. bedient man sich veränderlicher Kohlewiderstände, deren Leitwert durch Pressung der Kohle variiert wird. Die Pressung der Kohle wird bewirkt durch eine geeignete Vorrichtung, die mittels Elektromagnet und Feder betätigt wird. In anderen Fällen steuert die schwankende Spannung ein Relais, das einen Motor in Tätigkeit setzt, der seinerseits wiederum den Abgreifschieber bewegt. Hier ist außerdem der Regler nach Pugno-Vanoni [1] zu erwähnen, der eine veränderliche Drossel darstellt.

Ein vielseitig angewandtes Regelorgan ist der Eisenwasserstoff-Widerstand [11]. Seine Strom-Spannungs-Charakteristik verläuft in einem gewissen Bereich nahezu parallel zur Spannungs-Koordinate, sodaß ein in Serie liegender Verbraucher nahezu konstante Spannung erhält. Da die Regelung nicht vollkommen ist, wurden besondere Schaltungen entwickelt, die es gestatten, eine weitestgehende Spannungskonstanz zu erreichen. Ein ebenfalls zu erwähnendes Verfahren ist die Anwendung der Elektronenröhre im Sättigungsgebiet [5]. In diesem Gebiet ist der Strom für alle Spannungen annähernd konstant. Die Güte dieses Verfahrens hängt jedoch in hohem Grade von der erreichbaren Konstanz der Heizquelle der Elektronenröhre ab. Genannt seien hier ferner die Uran-Stromnormale, die bei Spannungen, die höher als die Sättigungsspannung sind, einen konstanten Strom liefern.

Eine andere Art der Schaltmöglichkeit bietet, wie schon erwähnt, die Verwendung eines nicht-linearen Widerstandes, dessen Strom-Spannungs-Charakteristik parallel zur Strom-Koordinate verläuft. Gasentladungen beispielsweise haben innerhalb eines gewissen Bereiches derartige Charakteristiken. In diesem Bereich ist die an ihnen liegende Spannung nahezu konstant. Diese Probleme wurden ebenfalls eingehend behandelt [12]. Eine erwähnenswerte diesbezügliche Anordnung

wurde von G. Medicus [3] angegeben. Sie dient insbesondere zum Betrieb von Zählrohren.

Es soll nunmehr die zweite prinzipielle Methode, nämlich jene, bei der regelnde magnetische Widerstände verwendet werden, betrachtet werden. Wenn man zwei elektrische Kreise magnetisch miteinander koppelt, so besteht die Möglichkeit, durch Beeinflussung der magnetischen Flußverteilung trotz schwankender Netzspannung dem sekundären Kreis eine konstante Spannung zu entnehmen. Die variable Flußverteilung setzt natürlich voraus, daß der magnetische Kreis einen veränderlichen Widerstand besitzt, der mit schwankendem primärem Fluß geeignete verschiedene Werte annimmt.

Eisenkerne von Transformatoren stellen im gekrümmten Teil der Magnetisierungskurve oder im „Sättigungsgebiet" derartige nicht-lineare magnetische Widerstände dar. Man könnte bei Transformatoren, die in einem Gebiet arbeiten, wo die Magnetisierungskurve parallel der Feldstärke-Koordinate verlaufen würde, sekundärseitig konstante Spannung entnehmen. Die Heranziehung dieses Prinzips scheitert jedoch grundsätzlich daran, daß „Sättigung" praktisch nur in begrenztem Umfange erreichbar ist, indem auch stärkst gesättigte Kerne immer noch, wenn auch geringe Flußänderungen bei Änderung des Feldes aufweisen.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, die eben erwähnten Verhältnisse durch Aufteilung des Flusses in parallele Zweige günstiger zu gestalten. Durch geeignete Schaltung und zweckmäßige Anordnung von Spulen und Kernen läßt sich eine noch weitgehendere Spannungskonstanz erreichen. Verfahren, die sich dieses Prinzips bedienen, sind bekannt und werden vielfach angewandt [6]. Es werden meist dreischenklige Transformatoren benutzt, deren einer Schenkel die Primärwicklung trägt, während ein weiterer Schenkel rasch gesättigt wird. Die so auftretende Unsymmetrie der Flußverteilung wird in geeigneter Weise zur Regelung von Schwankungen der speisenden Netzspannung herangezogen. Eine völlige Ausgleichung der primären Netzschwankungen ist aber auf diese Weise nicht

möglich, da, wie schon oben erwähnt, eine vollkomene Sättigung nicht erreichbar ist.

3. Grundsätzliche Wirkungsweise des neuen Transformators.

Bei einem diese Nachteile vermeidenden Regeltransformator muß die Aufteilung des Primärflusses in der Weise erfolgen, daß der magnetische Widerstand des einen Teilkreises konstant bleibt und der des zweiten nach einer solchen Funktion der Primärspannung verändert wird, daß er die gesamten Flußschwankungen aufnimmt, sodaß die auf dem genannten ersten Teilkreis konstanten Widerstandes sitzende Sekundärwicklung konstanten Fluß und damit konstante Spannung führt. Eine solche Änderung des magnetischen Widerstandes kann z. B. durch einen veränderlichen Luftspalt erreicht werden. Dieser Gedanke liegt dem zu beschreibenden Regeltransformator zugrunde. Man kann mit ihm genügend hohe Spannung erzeugen, die in einer Ventil-Kondensator-Schaltung auf einfache Weise in hochgespannte konstante Gleichspannung umgeformt werden kann.

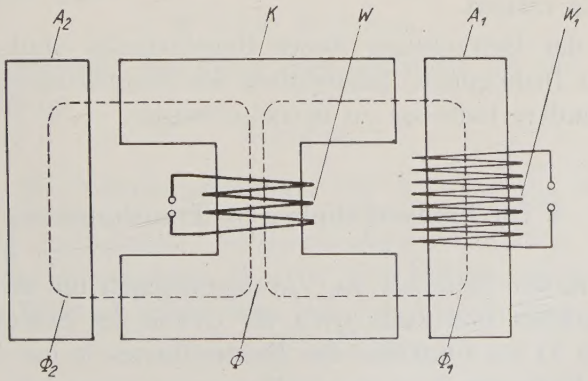

Abb. 1. Prinzipieller Aufbau des Transformators

Der prinzipielle Aufbau des Transformators, der in Abb. 1 gezeigt wird, ist folgender: ein Doppel-T-förmiger Kern K trägt

die Primärwicklung W. An den beiden Enden des Doppel-T-Kernes liegen die Anker A_1 und A_2. Beide Anker sind durch je zwei veränderliche Luftspalte vom Kern getrennt. Einer der beiden Anker trägt die Sekundärwicklung W_1.

Die Wirkungsweise des Transformators beruht darauf, daß der durch die aufgedrückte Primärspannung entstehende magnetische Fluß Φ in die beiden Flüsse Φ_1 und Φ_2 geteilt wird. Der Anteil Φ_1 des Gesamtflusses durchsetzt die Sekundärspule und erzeugt die elektromotorische Kraft e_1. Da die Sekundärspannung konstant sein soll, muß dieser Anteil des Flusses konstant bleiben. Der weitere Anteil Φ_2 des Gesamtflusses, der Streufluß, der durch einen magnetischen Nebenschluß fließt, soll die infolge der Netzspannungsschwankungen auftretenden Flußänderungen aufnehmen. Die Hauptaufgabe besteht nun darin, diesen Nebenschluß so zu gestalten, daß er selbsttätig die Flußschwankungen aufnimmt.

Die jeweilige Flußverteilung ist durch den Widerstand der zwei parallelen magnetischen Kreise bestimmt. Der magnetische Widerstand seinerseits wird vermittels der vorgesehenen Luftspalte variiert.

Bei der Betrachtung dieses Regelprinzips sind nun verschiedene Bedingungen hinsichtlich der Flußverteilung und der Widerstandsverhältnisse zu berücksichtigen.

4. Die Flußverhältnisse im Transformator.

Es werden zunächst die Voraussetzungen für die Flußverteilung geklärt und zwar wird die Größe des Streuflusses Φ_2 (vgl. Abb. 1) als Funktion des Gesamtflusses Φ mit dem konstant zu haltenden Fluß Φ_1 als Parameter unter folgenden Bedingungen betrachtet:

1. Es soll eine innerhalb der Grenzen u′ und u″ schwankende Netzspannung u geregelt werden.

2. Es sollen die beim Regelvorgang auftretenden Werte der Flüsse Φ_1 und Φ_2 nur innerhalb gewisser Minimal- bzw. Maximalbeträge Φ_{1min} und Φ_{1max} bzw. Φ_{2min} und Φ_{2max} liegen. Diese Einschränkung ist durch noch später (Kap. 11 S. 38) zu erörternde Umstände bedingt, die in der angewandten Methode der selbsttätigen Regelung liegen.
3. Es soll die günstigste Verteilung des zur Verfügung stehenden Gesamtflusses angestrebt werden.

Φ, Φ_1 und Φ_2 sind die Scheitelwerte der Flüsse.

Unter Berücksichtigung obiger Gesichtspunkte läßt sich folgendes ausführen:

Aus dem Induktionsgesetz ergeben sich die primäre EMK e und die sekundäre EMK e_1 zu

$$e = \frac{\Phi}{\sqrt{2}} \omega z \, 10^{-8}, \quad e_1 = \frac{\Phi_1}{\sqrt{2}} \omega z_1 \, 10^{-8}.$$

Darin sind $\omega = 2\pi\nu$ die Kreisfrequenz, z die primäre und z_1 die sekundäre Windungszahl.

Setzt man $c = \frac{\sqrt{2} \cdot 10^8}{\omega z}$, $c_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot 10^8}{\omega z_1}$

dann ergibt sich

$$\Phi = c\, e, \quad \Phi_1 = c_1 e_1. \qquad (1)$$

Bei auftretenden Spannungsschwankungen ist die jeweilige Netzspannung

$$u = k\, u_N,$$

wenn u_N die Netznennspannung und $k = 1 + \frac{p}{100}$ ist. Hierin ist p die prozentuale Netzspannungsschwankung. Für den niedrigsten auftretenden Wert u′ der Netzspannung und den höchsten Wert u″ gelten dann folgende Beziehungen:

$$u' = k'\, u_N, \quad u'' = k''\, u_N$$

Hierbei sind k′ bzw. k″ die Werte von k für die extremsten Spannungsschwankungen.

Unter Vernachlässigung des Ohmschen und induktiven Spannungsabfalles ergibt sich nach (1) für die jeweiligen Flüsse

$$\Phi = c\,e = k\ c\,u_N = k\ \Phi_N \qquad (2)$$
$$\Phi' = c\,e' = k'\ c\,u_N = k'\ \Phi_N \qquad (2a)$$
$$\Phi'' = c\,e'' = k''\ c\,u_N = k''\ \Phi_N \qquad (2b)$$

Hierbei sind $\Phi_N = c\,u_N$ der Wert des Flusses bei Netznennspannung und Φ' bezw. Φ'' die Werte bei minimaler bezw. maximaler Netzspannung.

Der Gesamtfluß Φ, der infolge der Spannungsschwankungen die Werte zwischen Φ' und Φ'' annehmen kann, setzt sich aus den beiden Teilflüssen Φ_1 und Φ_2 zusammen.

Es ist also

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \qquad (3)$$

Nach (1), (2), (2a), (2b) und (3) ergibt sich für den jeweiligen Streufluß

$$\Phi_2 = k\ \Phi_N - \Phi_1 = k\ c\,u_N - c_1\,e_1 \qquad (4)$$
$$\Phi_2' = k'\ \Phi_N - \Phi_1 = k'\ c\,u_N - c_1\,e_1 \qquad (4a)$$
$$\Phi_2'' = k''\ \Phi_N - \Phi_1 = k''\ c\,u_N - c_1\,e_1 \qquad (4b)$$

Die oben betrachteten Extremwerte der Flüsse werden hervorgerufen durch die maximalen Spannungsschwankungen. Wichtige für die Betrachtung des Transformators ebenfalls zu beachtende Extremwerte der Flüsse sind die eingangs erwähnten Maximal- bezw. Minimalbeträge, die für die Regelung noch anwendbar sind. Diese seien mit $\Phi_{1\,max}$ bezw. $\Phi_{1\,min}$ für Φ_1 und mit $\Phi_{2\,max}$ bezw. $\Phi_{2\,min}$ für Φ_2 bezeichnet. Die geforderte Bedingung wird dann durch die folgenden Beziehungen wiedergegeben

$$\Phi_{1\,min} < \Phi_1 < \Phi_{1\,max}$$
$$\Phi_{2\,min} < \Phi_2 < \Phi_{2\,max}$$

Es soll nun weiterhin die Frage untersucht werden, ob irgendwelche Voraussetzungen für eine günstige Verteilung beider Flußanteile Φ_1 und Φ_2 bestehen, die bei der Wahl der Flußverteilung zu berücksichtigen sind. Diese Frage kann man beispielsweise unter dem Gesichtspunkt einer günstigsten Flußausnutzung betrachten. Die Auswirkung einer solchen Forderung soll im folgenden geschildert werden.

Zwecks günstigster Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Gesamtflusses ist es erforderlich, den die Schwankungen

aufnehmenden Streufluß Φ_2 klein zu halten. Φ_2' ist der kleinste infolge der Schwankungen auftretende Wert dieses Flusses. Man muß also bestrebt sein, diesen Wert so klein wie möglich zu halten. Der günstigste Fall ist offenbar dann gegeben, wenn $\Phi_2 = 0$ ist. Da jedoch das Einhalten eines bestimmten Mindestwertes $\Phi_{2\,min}$ vorgeschrieben ist, muß man sich darauf beschränken, als besterreichbaren Fall anzunehmen $\Phi_2' = \Phi_{2\,min}$. Aus (4a) ergibt sich dann für den angenommenen Fall

$$\Phi_1 = k' \Phi_N - \Phi'_2 \qquad (5)$$

Durch diesen Ausdruck ist der Fluß in der Sekundärspule für den Fall günstigster Flußausnutzung gegeben. Der Wert von Φ' und somit auch von Φ_N muß nunmehr so gewählt werden, daß der sich ergebende Wert für Φ_1 innerhalb der Werte $\Phi_{1\,max}$ und $\Phi_{1\,min}$ liegt.

Nach diesen Ausführungen über die Flußverhältnisse werden im folgenden Abschnitt die näheren Umstände besprochen, die bei der Erzeugung dieser Flüsse zum Zwecke einer Regelung maßgebend sind.

5. Der Flußverteilungsfaktor und die Gleichung des Regelvorganges.

Die Größe magnetischer Flüsse ist proportional der jeweiligen magnetischen Umlaufspannung und umgekehrt proportional dem magnetischen Widerstand. Die Durchflutung und mithin auch die magnetische Umlaufspannung ist in den beiden parallelen Kreisen mit den Flüssen Φ_1 und Φ_2 gleich. Also sind die magnetischen Flüsse umgekehrt proportional den zugehörigen magnetischen Widerständen w_1 und w_2 und es gilt dann

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{w_2}{w_1} \qquad (6)$$

Nach Einsetzen der Werte aus (1) und (4) ergibt sich

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{c\, u_N}{c_1\, e_1}\, k - 1$$

Der in dieser Gleichung auftretende Wert $\frac{c\, u_N}{c_1\, e_1} = \frac{\Phi_N}{\Phi_1}$ stellt bei der Forderung konstanter Sekundärspannung eine Konstante dar, die als Flußverteilungsfaktor bezeichnet werden soll. Sie stellt das Verhältnis des Gesamtflusses zu dem als Parameter betrachteten Teilfluß Φ_1 bei Netznennspannung dar. Es wird gesetzt

$$\gamma = \frac{\Phi_N}{\Phi_1} = \frac{c\, u_N}{c_1\, e_1} \tag{7}$$

Dann ergibt sich die dem Regelvorgang zugrundeliegende Gleichung

$$\frac{w_1}{w_2} = \gamma\, k - 1 \tag{8}$$

Außer den Einschränkungen in der Anwendbarkeit des zur Verfügung stehenden Flusses bestehen auch Einschränkungen bezüglich der Veränderlichkeit der magnetischen Widerstände. Bestimmte obere und untere Grenzen, die mit $w_{1\,max}$, $w_{2\,max}$ und $w_{1\,min}$, $w_{2\,min}$ bezeichnet seien, können nicht überschritten werden. Das ist leicht einzusehen, denn wenn einerseits l_1 bezw. $l_2 = 0$ ist, d. h. also wenn der Anker und das Kernjoch aneiander zu liegen kommen, dann ist noch der Widerstand des Eisens zu überwinden. Bei l_1 bezw. $l_2 = 0$ ist demnach w_1 bezw. $w_2 = 0$. Wenn andererseits l_1 bezw. $l_2 = \infty$ ist, d. h. praktisch ausgedrückt, wenn der Anker sich in genügend weiter Entfernung vom Kern befindet, dann wird ein gewisser Grenzwiderstand erreicht, der durch die Verteilung der Kraftlinien in dem den Transformator umgebenden Raum bestimmt ist und der durch eine Ankerbewegung dann nicht mehr merklich beeinflußt wird. Der Widerstand nähert sich asymthotisch einem Grenzwert.

Es wird weiterhin noch die Annahme gemacht, daß der Widerstand w_1 eine feste Einstellung erhält, während w_2 sich entsprechend den Spannungsschwankungen ändern soll. Der

magnetische Widerstand w_2 muß dann bei Spannungsschwankungen nach (8) folgenden Wert annehmen.

$$w_2 = \frac{w_1}{\gamma k - 1} \tag{9}$$

k schwankt hierin innerhalb der Werte k′ und k″, während w_1 als Parameter betrachtet wird.

Die geschilderten Verhältnisse sollen im folgenden anschaulich dargestellt werden. Abb. 2 zeigt die durch (9) ge-

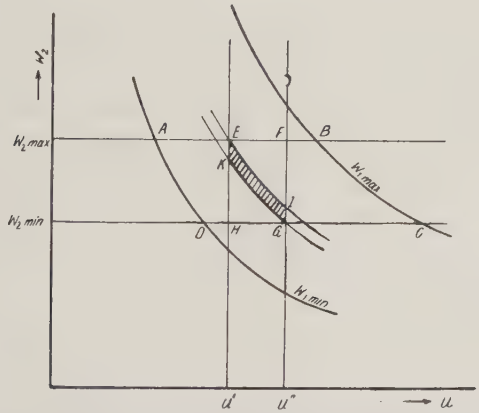

Abb. 2. Der bei der Regelung durch den beweglichen Anker einzustellende Wert des magnetischen Widerstandes und der Einfluß der Widerstandsbegrenzungen

gebene Kurvenschar. In dieser Abbildung ist auf der Abszisse die angelegte Spannung aufgetragen, die ja dem in (9) enthaltenen Werte k proportional ist. Die Ordinate stellt den einzustellenden Widerstandswert des magnetischen Kreises dar, der den Fluß Φ_2 führt. Die für die Regelung in Betracht kommenden Werte liegen innerhalb des durch ABCD eingeschlossenen Gebietes. AB und CD sind gegeben durch die obere und untere Grenze von w_2; ebenso sind gegeben BC und AD durch obere und untere Grenze von w_1. Von diesem zur Verfügung stehenden Gebiet wird nur der durch EH und FG eingegrenzte Bezirk benötigt, da durch die auftretenden Spannungsschwan-

kungen die Werte von u′ bis u″ vorkommen. Von dem jetzt ausgeschnittenen Teil der Kurven sind nur diejenigen von Wichtigkeit, die von EK bis IG reichen, da natürlich eine Regelung über den ganzen Bereich von u′ bis u″ gewährleistet sein muß. Das nunmehr noch verbleibende Regelgebiet wird durch die schraffierte Fläche EIGK dargestellt. Die zwischen EI und KG liegenden Kurvenstücke verschiedenen Widerstandes w_1 stellen innerhalb des Regelbereiches k′ bis k″ und innerhalb der anwendbaren Grenzen der Widerstände w_1 und w_2 den Zusammenhang von Spannung und veränderlichem Widerstand w_2 dar. Die betrachteten Kurvenstücke haben alle den gleichen Wert von γ. Sie werden also durch über k errichtete Ordinaten nach (8) nur in Punkten gleicher Werte für w_1/w_2 geschnitten. Diese Punkte unterscheiden sich aber durch ihre verschiedenen Werte von w_1 und w_2 selbst.

6. Betrachtungen über die günstigste Flußverteilung.

Es ist wichtig, den für den Betrieb des Transformators günstigsten Wert von γ zu kennen. In den Betrachtungen über die günstigste Flußverteilung in Kap. 4 ist unter Zugrundelegung bester Flußausnutzung die Größe der für die Berechnung dieser Betriebskonstanten γ erforderlichen Werte angegeben. Der hierfür geltende spezielle Wert von γ soll mit $\bar{\gamma}$ bezeichnet werden. Man erhält dann nach (5) und (7)

$$\bar{\gamma} = \frac{\Phi_N}{k' \Phi_N - \Phi_{2\,\min}}$$

Im folgenden sollen die sich ergebenden Forderungen für die günstigste Flußverteilung bezw. die Größe des Faktors γ im Hinblick auf einen möglichst großen Regelbereich des Transformators untersucht werden. Nach (9) ist die Widerstandsänderung dw_2 für den einer bestimmten Spannungsänderung entsprechenden Wert dk

$$d w_2 = - \frac{w_1 \gamma}{(\gamma k - 1)^2} \, d k$$

Es soll innerhalb der Grenzen k′ bis k″ geregelt werden. Die zu diesen Grenzen gehörigen Werte von w_2 seien w_2' und w_2''. Die Widerstandsänderung für den ganzen Bereich ist dann

$$w_2' - w_2'' = \int_{k''}^{k'} - \frac{w_1 \gamma}{(\gamma k - 1)^2} \, dk = \Big|_{k''}^{k'} \frac{w_1}{\gamma k - 1}$$

Die Werte w_2' und w_2'' müssen, wie schon gesagt, innerhalb der äußersten Grenzen $w_{2\,max}$ und $w_{2\,min}$ liegen. Wir gehen nun von der Annahme aus, daß die Regelung innerhalb eines bestimmten Bereiches $w_{2\,max}$ bis $w_{2\,min}$ möglich ist. Wenn es sich darum handelt, einen größtmöglichen Regelbereich k′—k″ zu erreichen, so muß der ganze verwendbare Bereich $w_{2\,min}$ bis $w_{2\,max}$ ausgenutzt werden, d. h. es ist dann $w_2' = w_{2\,max}$ bezw. $w_2'' = w_{2\,min}$ und daher

$$w_2' - w_2'' = w_{2\,max} - w_{2\,min}$$

Setzt man

$$\varrho_2 = w_{2\,max} - w_{2\,min}$$

dann ist

$$\varrho_2 = \frac{w_1}{\gamma k' - 1} - \frac{w_1}{\gamma k'' - 1}$$

Da ϱ_2 eine Konstante ist, ist der Wert der rechten Seite der Gleichung durch diese festgelegt. Es soll nun untersucht werden, welche weiteren Voraussetzungen gegeben sein müssen, um einen möglichst großen Regelbereich k″—k′ zu erhalten. Diese Forderung stellt ein Problem der Variationsrechnung dar. Die oben aufgestellte Gleichung enthält zunächst die vier Parameter w_1, γ, k′ und k″ über deren Größe noch keine näheren Angaben gemacht sind und über die noch nähere Bestimmungen getroffen werden müssen. Zur weiteren Betrachtung wird gesetzt $C = \frac{\varrho_2}{w_1}$. Dann gilt folgende Beziehung

$$\frac{1}{\gamma k' - 1} - \frac{1}{\gamma k'' - 1} - C = 0 \qquad (10)$$

Es werden die Bedingungen festgestellt, die es gestatten, ein Maximum der Differenz k'' bis k' zu finden. Dabei werden eventuelle Beziehungen der beiden Größen k' und k'' in Betracht gezogen. Es gelten für sie die Gleichungen

$$k' = 1 - \varkappa', \quad k'' = 1 + \varkappa''$$

Wenn $x' = \frac{p'}{100}$ und $x'' = \frac{p''}{100}$ ist. Bei einer Variation des gesamten Spannungsregelbereiches stehen zunächst verschiedene Möglichkeiten der Verteilung des Gesamtbereiches auf Über- und Unterspannung offen. Man kann beispielsweise fordern, daß

1. der gesamte Spannungsregelbereich zu bestimmten Teilen auf die Regelung von Über- und Unterspannung verteilt werden soll. Ein gegebener Verteilungsfaktor ξ schreibt das Verhältnis von regelbarer Über- zu regelbarer Unterspannung vor;
2. die Verteilung des Regelbereichs gleichmäßig auf Über- und Unterspannung erfolgt, d. h. daß der unter 1. genannte Verteilungsfaktor $\xi = 1$ ist;
3. folgende Verteilung vorgenommen werden soll: eine zu regelnde höchste Spannung steht fest und jede weitere Vergrößerung des Regelbereiches soll der Vergrößerung des Regelbereiches der Unterspannung zufallen.

Oben genannte Forderungen lassen sich durch folgende Beziehungen wiedergeben:

1. $\varkappa' = \xi\, \varkappa''$
2. $\varkappa' = \varkappa''$
3. $\varkappa'' = \text{const} = \beta$

Unter Berücksichtigung dieser Beziehungen ergeben sich für k' und k'' folgende Werte:

1.	$k' = 1 - \xi\, \varkappa''$	$k'' = 1 + \varkappa''$
2.	$k' = 1 - \varkappa''$	$k'' = 1 + \varkappa''$
3.	$k' = 1 - \varkappa'$	$k'' = 1 + \beta$

Hieraus wiederum erhält man für $k''-k'$

1. $k''—k' = \varkappa''(1 + \xi)$
2. $k''—k' = 2\varkappa''$
3. $k''—k' = \beta + \varkappa'$

Diese Gleichungen zeigen, daß das Maximum des Regelbereiches auftritt, wenn $\varkappa''$ bezw. $\varkappa'$ ein Maximum haben. Wenn man nunmehr die Werte k' und k'' in (10) einsetzt, ergeben sich folgende Gleichungen:

1. $\dfrac{1}{\gamma(1—\xi\varkappa'')—1} — \dfrac{1}{\gamma(1+\varkappa'')—1} — C = 0$
2. $\dfrac{1}{\gamma(1—\varkappa'')—1} — \dfrac{1}{\gamma(1+\varkappa'')—1} — C = 0$
3. $\dfrac{1}{\gamma(1—\varkappa')—1} — \dfrac{1}{\gamma(1+\beta)—1} — C = 0$

Als Variable haben hierin noch γ und $\varkappa'$ bezw. γ und $\varkappa''$ zu gelten. Wie oben gesagt, müssen für einen größtmöglichen Regelbereich die Variablen $\varkappa'$ bezw. $\varkappa''$ ein Maximum annehmen. Es muß also festgestellt werden, wo obige Funktionen Maxima für $\varkappa'$ bezw. $\varkappa''$ haben.

Diesbezüglich angestellte Untersuchungen hatten folgende Ergebnisse:

1. Mit größtmöglicher Wahl von γ ist auch ein größter Wert des Regelbereiches verbunden, der bei $\gamma = \infty$ den Wert $\frac{1}{\xi}$ annimmt. Je kleiner die Wahl von γ getroffen wird, desto kleiner wird auch der zur Verfügung stehende Regelbereich, der bei $\gamma = 1$ den Wert Null hat.
2. Als Spezialfall von 1) gilt das in 1) dargelegte, mit der Besonderheit, daß $\xi = 1$ ist. Der größtmögliche Regelbereich hat für $\gamma = \infty$ den Wert $\varkappa'' = 1$.
3. Auch hier ergibt sich die Forderung wegen der Erzielung eines großen Regelbereiches einen möglichst großen Wert von γ anzuwenden.

Bei dem Bestreben, einen möglichst hohen Wert des Flußverteilungsfaktors γ anzuwenden, muß man sich jedoch ver-

gegenwärtigen, daß dessen Wert nicht beliebig hoch gewählt werden kann, denn er ist ebenso wie der schon betrachtete kleinste Wert, gewissen einschränkenden Bedingungen unterworfen. Es können hier die analogen Betrachtungen angestellt werden, wie bei der Untersuchung der Verhältnisse für beste Flußausnutzung.

Wenn man die Ergebnisse, die sich auf die Erzielung eines möglichst großen Regelbereiches beziehen, vergleicht mit der Bedingung, die eine beste Flußausnutzung ergibt, so ist zu erkennen, daß gegensätzliche Forderungen für die Größe des Wertes γ erfüllt werden sollen. Während eine beste Flußausnutzung einen möglichst kleinen Wert von γ voraussetzt, bedingt ein großer Regelbereich einen möglichst großen Wert von γ. Es gilt also hier, einen Kompromiß zu schließen, zwischen großem Regelbereich und bester Flußausnutzung. An späterer Stelle wird noch auf weitere für die Größe des Flußverteilungsfaktors in Betracht zu ziehende Gesichtspunkte eingegangen.

7. Die Durchflutung und der Magnetisierungsstrom.

Im Folgenden wird die Größe der Durchflutung bezw. des Magnetisierungsstromes festgestellt. Für die Flüsse des Transformators gilt nach (3) $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2$. Hierin ist $\Phi_1 = \frac{\oint H\,dl}{w_1}$ und $\Phi_2 = \frac{\oint H\,dl}{w_2}$ wenn $\oint H\,dl$ die in beiden Kreisen gleiche magnetische Umlaufspannung darstellt. Da die magnetische Umlaufspannung gleich der Durchflutung, also auch der Ampere-Windungszahl ist, so gilt $\oint H\,dl = i\,z$, wenn i der Magnetisierungsstrom ist. Es ist also

$$i\,z = \frac{k\,\Phi_N}{\frac{1}{w_1} - \frac{1}{w_2}} \qquad (11)$$

Da die Größen Φ_N und w_1 konstante Werte haben sollen, so ist

$$\Phi_1 w_1 = \oint H \, dl = i z = \text{const.}$$

Der Magnetisierungsstrom hat also für alle Netzspannungen bei einer bestimmten Sekundärspannung einen konstanten Wert. Es ist selbstverständlich, daß für eine Änderung der Netzspannung, die sich aus (11) ergebende Änderung von w_2 stattfinden muß.

8. Die magnetische Widerstandsvariierung und die Regelvorgangs-Gleichung.

Im Folgenden wird die Frage der Widerstandsvariierung näher betrachtet. An dem Transformator sind, wie schon erwähnt, zwei Anker angebracht, die durch Luftspalte vom Kern getrennt werden. Diese beiden Luftspalte von der Länge l_1 bezw. l_2 gestatten eine einfache Variierung der Widerstände w_1 bezw. w_2. Sie lassen sich darstellen durch die Funktionen

$$w_1 = f(l_1)$$
$$w_2 = f(l_2).$$

Wenn diese Funktionen bekannt sind und in (9) eingesetzt werden, kann dann weiterhin die Funktion

$$l_2 = f(k)$$

mit l_1 als Parameter ermittelt werden. D. h. es wäre damit die Ankereinstellung für die jeweils herrschende Netzspannung gegeben.

Zur Berechnung des jeweiligen magnetischen Widerstandes ist es nötig, den Verlauf des magnetischen Kraftfeldes als Funktion des Ankerabstandes zu kennen. Eine exakte Behandlung stößt auf nicht zu lösende mathematische Probleme. Es wurde deshalb der Weg beschritten, diese Funktion experimentell an einem Versuchstransformator festzustellen und in eine empirische mathematische Form zu bringen. Nach vorläufigen Messungen ergab sich, daß sich diese Funktionen innerhalb des praktisch vorkommenden Bereiches beispielsweise durch folgende Gleichungen wiedergeben lassen:

$$w_1 = \varrho_1 (1 - \varepsilon^{-\sigma_1 l_1}) + w_{1\,\min} \qquad (12a)$$

$$w_2 = \varrho_2 (1 - \varepsilon^{-\sigma_2 l_2}) + w_{2\,\min} \qquad (12b)$$

Hierin sind ε die Basis des natürlichen Logarithmensystems und σ_1 und σ_2 Koeffizienten von der Dimension cm^{-1}. Fernerhin bedeuten

$$\varrho_1 = w_{1\,\max} - w_{1\,\min}$$

$$\varrho_2 = w_{2\,\max} - w_{2\,\min}$$

Die Werte $w_{1\,\min}$, $w_{2\,\min}$, ϱ_1, ϱ_2 und die Koeffizienten σ_1 und σ_2 können auf folgende Weise gefunden werden. Führt man die Widerstände w_1 und w_2 aus (12a) und (12b) in (11) ein, so hat man folgende Beziehung:

$$\frac{1}{\varrho_1 (1 - \varepsilon^{-\sigma_1 l_1}) + w_{1\,\min}} - \frac{1}{\varrho_2 (1 - \varepsilon^{-\sigma_2 l_2}) + w_{2\,\min}} = \frac{k\,\Phi_N}{i\,z} \qquad (13)$$

Wenn l_1 und l_2 alle Wertekombinationen, die mit Null und ∞ möglich sind, annehmen, lassen sich nach Messung der jeweiligen Magnetisierungsströme vier Gleichungen angeben, aus denen die vier Unbekannten $w_{1\,\min}$, $w_{2\,\min}$, ϱ_1, ϱ_2 ermittelt werden können. Die so erhaltenen Werte in (13) eingesetzt, ergeben eine Beziehung, in der die Koeffizienten σ_1 und σ_2 noch unbekannt sind. Diese lassen sich nunmehr ebenfalls experimentell ermitteln. Es läßt sich jetzt weiterhin die gewünschte Funktion, die den Regelvorgang darstellt, angeben. Man erhält aus (9) und (12a, b)

$$l_2 = \frac{\ln \varrho_2 - \ln \left(w_{2\,\max} - \dfrac{w_1}{k\,\gamma - 1}\right)}{\sigma_2}$$

Der Fluß Φ_1 ist maßgebend für die sekundäre EMK e_1. Über den Zusammenhang zwischen Φ_1 und e_1 ist noch folgendes zu bemerken:

In den vorausgehenden Ausführungen wurde von der Annahme ausgegangen, daß der gesamte Teilfluß Φ_1 den Anker mit der Sekundärspule durchsetzt und daß der Anteil des Flus-

ses, der nicht seinen Weg durch den Anker nimmt, vernachlässigbar klein ist. Diese Voraussetzung ist selbstverständlich für die Art und Weise der Regelung mit Luftspalt- bzw. Ankerabstandsvariierung nicht ohne weiteres gerechtfertigt. Wenn auch der magnetische Leitwert beider Anker wesentlich größer ist als der des umgebenden Raumes, so ist doch klar, daß bei größer werdendem Luftspalt der nicht mehr den Anker durchsetzende Fluß einen nicht zu vernachlässigenden Wert annimmt, und daß für den hier beschrittenen Weg der Widerstandsvariierung die Voraussetzung, daß der Fluß Φ_1 die Sekundärspannung erzeugt, nicht ohne weiteres gültig ist. Es besteht dann also nicht mehr die Beziehung $\Phi_1 = e_1 c_1$, sondern da nicht der gesamte Fluß Φ_1 für das Zustandekommen der Sekundärspannung verantwortlich ist, muß ein Zusammenhang $c_1 = f(\Phi_1, l_1)$ bestehen. Diese Funktion läßt sich nicht exakt berechnen. Man kann jedoch vermuten, daß für kleine Ankerabstände die Beziehung $\Phi_A \approx \Phi_1$ angesetzt werden darf, wobei Φ_A der den beweglichen Anker durchsetzende Anteil des Flusses Φ_1 bedeutet. Über einen größeren Bereich lassen sich die Verhältnisse durch eine Exponentialfunktion von der Form $\Phi_A = K \Phi_1 \varepsilon^{-\delta l_1}$ wiedergeben. Dabei bedeutet K den Bruchteil des Primärflusses Φ_1, der den Anker durchsetzt, wenn dessen Abstand $l_1 = 0$ ist. Der Fluß Φ_A ruft die Sekundärspannung hervor nach der Beziehung

$$e_1 = \frac{K}{c_1} \Phi_1 \varepsilon^{-\delta l_1}$$

Unter Berücksichtigung dieser Umstände ergibt sich die folgende Regelvorgangsgleichung:

$$l_2 = \frac{\ln \varrho_2 - \ln \left(w_{2\,max} - \dfrac{w_1 e_1 c_1 \varepsilon^{\delta l_1}}{k K \Phi_N - e_1 c_1 \varepsilon^{\delta l_1}} \right)}{\sigma_2} \qquad (14)$$

Die Möglichkeit der Spannungsregelung innerhalb des praktisch notwendigen Bereiches auf die beschriebene Art und Weise wurde durch die Ergebnisse von Voruntersuchungen bestätigt. Meßergebnisse werden später gebracht.

9. Die selbsttätige Regelung des Transformators.

Es erhebt sich nunmehr die weitere Frage nach der Möglichkeit einer selbsttätigen Regelung des Transformators, d. h. also die Forderung, Mittel zu finden, durch die sich der Anker A_2 bei Spannungsschwankungen selbsttätig in die durch die Regelvorgangsgleichung (14) vorgeschriebene Entfernung einstellt.

Es wurde der Weg gewählt, die veränderliche Anziehungskraft, die infolge der Flußschwankungen auf den Anker wirkt, zu diesem Zwecke dienstbar zu machen. Es gehören zu jeder Regelkurve für die verschiedenen Sekundärspannungen bzw. Ankerabstände auch bestimmte Flußwerte und damit bestimmte Anziehungskräfte, die auf den Anker A_2 wirken. Wenn diese Kraft als Funktion des Abstandes bekannt ist, so ist nur die Aufgabe zu lösen, eine gleichgroße, entgegengesetztgerichtete Kraft zu finden, und diese auf den Anker wirken zu lassen. Dann wird sich der Anker bei Spannungsänderungen in eine jeweils dieser Spannung entsprechende Entfernung einstellen. Im folgenden soll dieser Gedanke näher betrachtet und die Möglichkeit der Verwirklichung einer solchen Regelmethode geprüft werden.

Um eine Lösung des Problems zu finden, wird zunächst die Frage nach der Größe der Anziehungskraft als Funktion des Ankerabstandes und zwar einerseits für die Sekundärspannung e_1 als Parameter und andererseits für den der Netzspannung u entsprechenden Wert k als Parameter einer Betrachtung unterzogen.

Man kann zu einer Beziehung zwischen diesen Größen kommen, wenn man von der Überlegung ausgeht, daß eine bestimmte Hubarbeit erforderlich ist, um den Anker in die jeweilige Stellung zu bringen. Die von dem Anker zu überwindende Kraft sei $\mathfrak{P}$. Dann ist die der virtuellen Verrückung dl_2 des Ankers A_2 entsprechende geleistete Hubarbeit $\mathfrak{P}\, dl_2$. Diese Hubarbeit muß durch zugeführte elektrische Energie dA_e gedeckt werden. Der Energieinhalt A_m des magnetischen Feldes

ändert sich hierbei ebenfalls um einen bestimmten Betrag dA_m und zwar auch auf Kosten zugeführter elektrischer Arbeit. Es ist also

$$\mathfrak{P}\, dl_2 + dA_m = dA_e$$

Wenn eine mechanische Arbeit $\mathfrak{P}\, dl_2$ nicht geleistet wird, d. h. also wenn eine Ankerbewegung nicht stattfindet und mithin der magnetische Widerstand konstant bleibt, geht die gesamte elektrische Energie dA_e in magnetische Feldenergie über. Die der elektrischen Energie dA_e entsprechende magnetische Energie sei mit dA bezeichnet. Es ist also bei $w_2 = \text{const.}$ die Beziehung gültig

$$dA_e = \left(\frac{\partial A}{\partial \Phi_2}\right)_{w_2} d\Phi_2$$

Wenn jedoch der Widerstand w_2 ebenfalls variabel ist, wird der Anteil der Energie dA_m, der in magnetische Feldenergie übergeht, dargestellt durch das totale Differential der Gesamtfeldenergie für variables Φ_2 und w_2. Es ist also

$$dA_m = \left(\frac{\partial A}{\partial \Phi_2}\right)_{w_2} d\Phi_2 + \left(\frac{\partial A}{\partial w_2}\right)_{\Phi_2} d w_2$$

und es gilt dann die Differentialgleichung

$$\mathfrak{P}\, dl_2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Phi_2}\right)_{w_2} d\Phi_2 - \left(\frac{\partial A}{\partial w_2}\right)_{\Phi_2} dw_2 = \left(\frac{\partial A}{\partial \Phi_2}\right)_{w_2} d\Phi_2$$

oder

$$\mathfrak{P}\, dl_2 = -\left(\frac{\partial A}{\partial w_2}\right)_{\Phi_2} d w_2$$

Da weiterhin die Energie A des magnetischen Feldes, ausgedrückt durch die Größen w_2 und Φ_2, sich ergibt zu

$$A = \frac{w_2}{2}\, \Phi_2^2$$

so ist

$$\mathfrak{P}\, dl_2 = -\frac{\Phi_2^2}{2}\, d w_2$$

und hieraus erhält man den Scheitelwert der Kraft zu

$$\mathfrak{P} = -\frac{\Phi_2^2}{2} \cdot \frac{d\,w_2}{d\,l_2}$$

Ihr Effektivwert ist dann die auf einen Anker wirkende Kraft P. Deren Größe ist

$$P = -\left(\frac{\Phi_2}{2}\right)^2 \frac{d\,w_2}{d\,l_2} \qquad (15)$$

In dieser Gleichung sind Φ_2 und l_2 in diesem Falle nicht unabhängig voneinander. Es besteht vielmehr eine Beziehung, die ausgedrückt wird durch die Funktion $\Phi_2 = f(l_2)$. Diese stellt sich verschieden dar, je nachdem, ob e_1 oder k als Parameter erscheinen soll; d. h. ob der Verlauf der Anziehungskraft bei konstanter Sekundärspannung e_1 oder bei konstanter angelegter Netzspannung u angegeben werden soll. Es muß gesetzt werden im ersten Falle nach (6)

$$\Phi_2 = \frac{w_1}{w_2}\,\Phi_1$$

und im zweiten Fall nach (2), (6) und (3)

$$\Phi_2 = \frac{k\,\Phi_N}{\frac{w_2}{w_1} + 1} \qquad (16)$$

Bezeichnet man die sich ergebende Kraft für konstante Sekundärspannung mit P und diejenige für konstante Netzspannung mit P′, so erhält man nach (15) und (6) bzw. (16)

$$P = -\left(\frac{\Phi_1 w_1}{2 w_2}\right)^2 \frac{d\,w_2}{d\,l_2} \qquad (17a)$$

$$P' = -\left(\frac{k\,\Phi_N}{2\left(\frac{w_2}{w_1} + 1\right)}\right)^2 \frac{d\,w_2}{d\,l_2} \qquad (17b)$$

Der Differentialquotient $\frac{d\,w_2}{d\,l_2}$ obiger Gleichungen (15), (17a) und (17b) nimmt in solchen Fällen, in denen w_2 durch einen

analytischen Ausdruck von der Form der Gleichung (12b) dargestellt werden kann, folgenden Wert an

$$\frac{d\,w_2}{d\,l_2} = \frac{\sigma_2\,\varrho_2}{\varepsilon^{\sigma_2 l_2}}$$

Bei Einsetzen dieses speziellen Wertes ergibt sich für die auf den Anker wirkende Kraft nach (15)

$$P = -\frac{\Phi_2^2\,\varrho_2\,\sigma_2}{4\,\varepsilon^{\sigma_2 l_2}}$$

Setzt man in dieser Gleichung die Werte in absoluten Einheiten ein, so erhält man P in Dyn. Wenn sich P in kg ergeben soll, und man setzt ein Φ_2 in Maxwell und ϱ_2 in Amperewindungen pro Maxwell, dann gilt folgende Beziehung

$$P = -\frac{1{,}02\,\Phi_2^2\,\varrho_2\,\sigma_2\,10^{-7}}{4\,\varepsilon^{\sigma_2 l_2}}\ \text{kg}$$

Das schon erwähnte Prinzip der selbsttätigen Regelung besteht nun darin, an dem Anker eine der Anziehung entgegengesetztgerichtete Kraft von der Größe P wirken zu lassen. Wenn an dem Transformator eine bestimmte Spannung angelegt wird, so ist weiterhin die Anziehungskraft des Ankers im Abstande l_2 gegeben durch P′. Es wird also eine Kraft ΔP von der Größe $\Delta P = P' + (-P)$ auftreten. Diese resultierende Kraft veranlaßt den Anker, eine Bewegung auszuführen, und damit den Abstand zu verändern. Es ist nun zu beweisen, daß unter der Voraussetzung des Wirkens einer der Anziehung entgegengerichteten Kraft gemäß (17a) der Anker sich so einstellt, daß die Bedingungen zur Erzielung konstanter Sekundärspannungen erfüllt sind. Für die resultierende Kraft, die die Regelkraft darstellt, erhält man unter Berücksichtigung von (17a) und (17b)

$$\Delta P = \left[\left(\frac{\Phi_1\,w_1}{2\,w_2}\right)^2 - \left(\frac{k\,\Phi_N}{2\left(\frac{w_2}{w_1}+1\right)}\right)^2\right]\frac{d\,w_2}{d\,l_2} \qquad (18)$$

Eine Untersuchung dieser Gleichung ergibt, daß unter gewissen Bedingungen die Größe ΔP den Wert Null annimmt, und daß

bei kleiner bzw. größer werdendem Abstand l_2 und mithin auch des Widerstandes w_2 der Wert von ΔP positiv bzw. negativ wird. Der Anker wird also von einer Ausgangsstellung aus bei Auftreten des Kraftflusses Schwingungen um diejenige Stellung herum ausführen, bei der $\Delta P = 0$ ist. Bei vorhandener Dämpfung wird der Anker dann auch an dieser Stelle zur Ruhe kommen. Die oben erwähnten Bedingungen sind dann erfüllt, wenn in (18)

$$\frac{\Phi_1 w_1}{w_2} = \frac{k \Phi_N}{\frac{w_2}{w_1} + 1}$$

ist. Hieraus erhält man nach entsprechender Umformung

$$\frac{w_1}{w_2} = \gamma k - 1$$

Die jeweilige Ankereinstellung wird durch obige Beziehung wiedergegeben. Da diese Gleichung die für die Regelung notwendige Bedingung (8) erfüllt, ist der Beweis erbracht, daß durch die angewandte Methode der selbsttätigen Regelung eine Lösung des Problems möglich ist.

Einen anschaulichen Überblick über die beschriebenen Verhältnisse gibt Abb. 3. Der Verlauf der Anziehungskraft bei

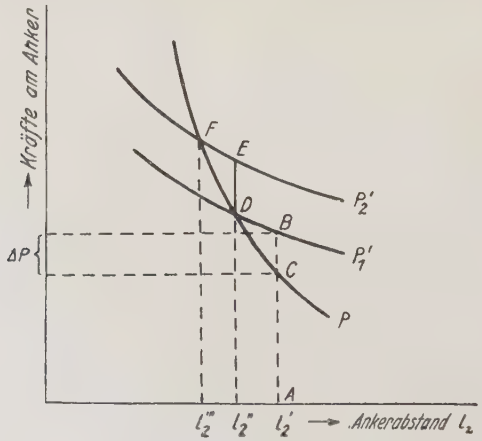

Abb. 3. Darstellung der auf den Anker wirkenden Kräfte zur Veranschaulichung des Regelvorganges

den konstanten Netzspannungen u_1 und u_2 wird für die vorliegende Form des Transformators (vgl. Abb. 1) durch die Kurven P_1' und P_2' wiedergegeben. P stellt den Verlauf der für die Regelung anzuwendenden Gegenkraft dar. Die Werte sind ohne Berücksichtigung ihrer Vorzeichen eingetragen. Es ist aber zu beachten, daß gemäß den früheren Ausführungen P_1' und P_2' als negativ zu betrachten sind. Um das Zustandekommen der Regelung zu verstehen, sei angenommen, der Anker befinde sich zunächst in der Stellung l_2', und die Netzspannung sei u_1. Die Strecke AB stellt dann die auf den Anker wirkende Anziehungskraft dar. Die am Anker angreifende Gegenkraft hat in dieser Stellung die Größe AC. Es verbleibt somit noch eine resultierende Kraft von der Größe $BC = \Delta P$. Da P_1' negativ ist, so ist an dieser Stelle auch ΔP negativ, d. h. die resultierende Kraft wirkt in Richtung von kleiner werdendem l_2. Der Anker führt demzufolge eine Bewegung aus, die eine Verkleinerung des Abstandes l_2 ergibt. Die resultierende Kraft wird während der Bewegung immer kleiner, um schließlich im Punkte D beim Abstand l_2'' gleich Null und weiter darüber hinaus sogar negativ zu werden; d. h. es wirkt bei einem Abstand, der kleiner als l_2'' ist, eine Kraft, die den Abstand zu vergrößern bestrebt ist. Die Abszissen der Schnittpunkte der Kurven für die verschiedenen Primärspannungen als Parameter mit der Kurve der Gegenkraft sind demnach diejenigen Werte, die die Einstellung des Ankers unter den gegebenen Verhältnissen darstellen. Es sei nun weiterhin angenommen, die Netzspannung steige von dem Werte u_1 auf den Wert u_2 an. Der Anker befindet sich dann zunächst noch im Abstand l_2''. Da für die Anziehungskraft jetzt die neue Kurve P_2' gilt, tritt infolge der Spannungsänderung eine um den Wert ED größere Kraft auf. Der Anker führt infolgedessen eine Bewegung aus. Die Kraftdifferenz wird erst dann wieder Null, wenn der Anker die neue Stellung l_2'' eingenommen hat. Dieser Wert ist dargestellt durch die Abszisse des Schnittpunktes F, in dem sich die Kurven P und P'' schneiden, und wo die Resultierende Null ist.

10. Messungen an einem Versuchstransformator.

Durch die vorhergehenden Erörterungen wurden die theoretischen Grundlagen des angewandten Regelprinzips geklärt. In folgenden werden ein Versuchstransformator und die an ihm vorgenommenen Messungen beschrieben. Es wurden die in den Gleichungen auftretenden Größen, wie magnetische Widerstände und Kräfte, festgestellt. Zur Ermittlung der Kräfte kann man zwei Wege einschlagen und zwar läßt sich einerseits die Kraft nach (17a, b) berechnen, wenn die Widerstände als Funktion des Abstandes l bekannt sind, und andererseits besteht die Möglichkeit, die Kraft zu messen. Es wurde zunächst der erste Weg beschritten und weiterhin zur Kontrolle auch die zweite Möglichkeit angewandt.

Der Aufbau des für die Vorversuche benutzten Transformators geht aus Abb. 4 hervor. Er besteht aus dem Doppel-T-

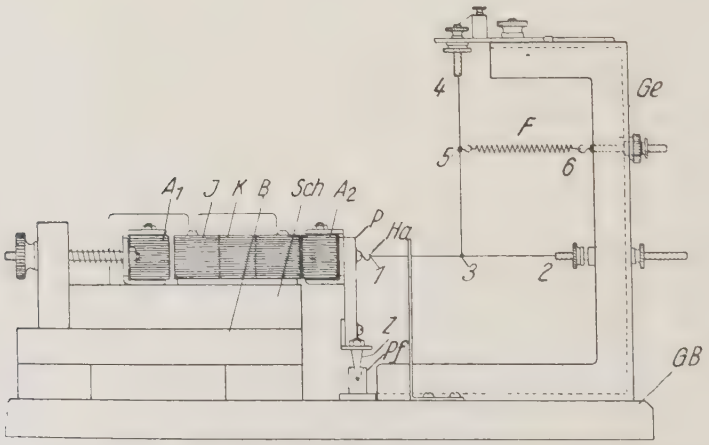

Abb. 4. Ein Regeltransformator mit Stahldraht-Kraftübersetzungssystem

Kern K, den Ankern A_1, A_2 und den Primär- und Sekundärwicklungen. Säule, Joch J und Anker A_1 sind auf zwei Gleitschienen Sch befestigt, die ihrerseits auf dem Holzgrundbrett B

ruhen. Die Säule des Kernes trägt die Primärwicklung, der Anker A_1 trägt die Sekundärwicklung. Am Anker A_1 sind zwei seitliche Ansätze befestigt, in welche Spindeln eingeschraubt werden. Vermittels dieser Spindeln und zweier Muttern M erfolgt die Einstellung des jeweils erforderlichen Luftspaltes l_1. Der bewegliche Anker A_2 wurde an einer Pertinaxplatte P befestigt. Diese erhielt an ihrem unteren Ende auf beiden Seiten je einen Zapfen Z. Die Zapfen wiederum ruhten in zwei Pfannen Pf. Die Pertinaxplatte erhielt einen Ausschnitt, (in der Abb. nicht sichtbar) in dem sich eine Feder befand. Die Feder war einerseits an einem Bügel und andererseits an einem auf der Pertinaxplatte angebrachten Messingplättchen befestigt. Sie hat den Zweck, die Zapfen in ihre Lager hineinzuziehen. An der Pertinaxplatte war außerdem ein Haken Ha eingeschraubt. An diesem Haken konnten die zur Kraftmessung verwandten Federn eingehängt werden. Das Kraftübersetzungssystem 1—6 war bei dieser für vorläufige Messungen dienenden Ausführung des Transformators nicht vorhanden. Die Hauptdaten des Transformators sind im folgenden angegeben:

Netznennspanung u_N	120 Volt
Fluß bei Nennspannung (Scheitelwert) in der Mittelsäule	43000 Maxwell
Induktion (Scheitelwert) in der Mittelsäule	9600 Gauss
Primärwicklung	1300 Windungen
Sekundärwicklung	2600 Windungen

Mittelsäule:

Länge	30 mm
Querschnitt	19,5 × 25,5 mm

Joche:

Länge	70 mm
Querschnitt	19,5 × 25,5 mm

Die Untersuchungen am Versuchstransformator wurden zunächst vorgenommen im Hinblick auf eine günstigste Einstellung des Transformators. Bei veränderlicher Sekundärspannung und verschiedenen Einstellungen des Ankers A_1 bzw. Luftspaltes l_1 wurde der Anker A_2 bzw. der Luftspalt l_2 so eingestellt, daß konstante Sekundärspannung herrschte. Ein Auffinden günstigster Einstellung bezog sich nun auf das Erreichen eines möglichst großen Regelbereiches und einer hohen Sekundärspannung. Einerseits nahm die Sekundärspannung mit größer werdendem Ankerabstand infolge der großen Zahl der nicht mehr im Anker verlaufenden Kraftlinien schnell ab; andererseits konnte der Ankerabstand nicht sehr klein gewählt werden, da dann die Regelwege zu klein wurden und sich Schwierigkeiten für die exakte Einstellung ergaben. Außerdem traten in zu großer Nähe des Kernes allzugroße Kräfte auf, bei denen sich keine reproduzierbaren Ergebnisse erwarten ließen. Unter Berücksichtigung dieser Umstände wurde ein Ankerabstand von etwa 0,4 cm als am günstigsten gefunden und zwar bei möglichst gleichen Abständen beider Anker für Netznennspannung. Es war in diesem Falle die Sekundärspannung in der Größe von 60—70 Volt, und der Regelbereich erstreckte sich zwischen 65—135 Volt. Die Meßergebnisse werden im folgenden gebracht.

Die Messungen wurden in der Weise ausgeführt, daß zur genauen Abstandsermittlung zwischen Anker und Jochen Hartpapier bzw. Hartholzstücke von bestimmter Dicke gelegt wurden. Es wurden beiderseits jeweils Stücke gleicher Dicke eingelegt und die den verschiedenen Abständen entsprechenden Werte des Leerlaufstromes und der Sekundärspannung bei einer bestimmten Netzspannung ermittelt. Da der Transformator, wie festgestellt wurde, in magnetischer Hinsicht symmetrisch war, gelten die gemessenen Werte für die zwei parallel geschalteten magnetischen Widerstände $w_1 = w_2$. Tabelle 1 zeigt in Spalte 1, 2 und 3 die Ergebnisse der Messung.

Tabelle 1

Primäre EMK ≈ Netzspannung = 120 Volt

1 Abstand d. Anker in cm	2 Leerlaufstrom in Amp.	3 Sekundärspannung in Volt	4 Magnetisierungsstrom in Amp.	5 Magnet. Widerst. in Amp.-Wdgn/Maxw.	6 σ in cm^{-1}	7 δ in cm^{-1}
0	0,054	102	0,052	$3{,}3 \cdot 10^{-3}$	—	—
0,05	195	93	195	12,2	4,2	1,85
0,1	280	84	280	17,5	3,6	1,95
0,16	340	77	340	21,3	3,06	1,75
0,2	385	73	385	24,1	3,0	1,68
0,4	525	61	525	32,9	2,58	1,28
0,6	600	52	600	37,6	2,27	1,12
1,2	705	36	705	44,1	1,8	0,87
	790	0	790	49,4	—	—

Die Abstandsmessung kann je nach der Länge des Luftspaltes mit etwa 5 –10 % Fehler angesetzt werden. Die bei der Messung des Leerlaufstromes sowie bei der Messung der Primär- und Sekundärspannung auftretenden Fehler sind hiergegen vernachlässigbar gering. Die gemessenen Werte gestatten die Ermittlung von ϱ, w, σ und δ. Es wurde zunächst der Magnetisierungsstrom berechnet und außerdem untersucht, inwieweit die Netzspannung und die durch den primären Fluß erzeugte Gegen-EMK der Größe nach gleichgesetzt werden können.

Zur Ermittlung des Magnetisierungsstromes wurde die Wirkkomponente des Leerlaufstromes aus den Eisenverlusten berechnet. Für 120 Volt und $l_1 = l_2 = 0$ erhält man einen Eisenverlust von etwa 1,6 Watt, der bei größer werdendem Ankerabstand etwas abnimmt. Das ergibt eine Wirkkomponente von etwa 13 mA. Bei Berücksichtigung dieses Wertes ist ersichtlich, daß außer für den Ankerabstand Null, der Leerlauf- und der Magnetisierungsstrom praktisch den gleichen Wert haben.

Auch Netzspannung und primäre Gegen-EMK sind für die früher als günstig gefundene Ankerentfernung von 0,4 cm prak-

tisch gleich und der Unterschied bleibt selbst bei Ankerabstand ∞ unter 1,7 %. Man kann also im Hinblick auf den verhältnismäßig großen Fehler bei der Abstandsmessung des Ankers die Fehler, die durch Einsetzung der Netzspannung statt der primären EMK begangen werden, vernachlässigen. Es gelten somit für den Magnetisierungsstrom die Werte in Spalte 4 der Tabelle 1. Da der Transformator in magnetischer Hinsicht symmetrisch ist, ergeben sich für die magnetischen Widerstände $w_1 = w_2$ die in Spalte 5 der Tabelle 1 wiedergegebenen Werte. Weiterhin erhält man für $\varrho = 46{,}1 \cdot 10^{3}$ Amp.Wdgn/Maxwell und für $w_{min} = 3{,}3 \cdot 10^{-3}$ Amp.Wdgn/Maxwell. Hieraus ergeben sich dann für σ und δ als Funktion des Ankerabstandes die Werte, die in Spalte 6 und 7 wiedergegeben sind.

Aus diesen ermittelten Größen lassen sich die auf die Anker wirkenden Kräfte berechnen. Die Kurven in Abb. 5 geben

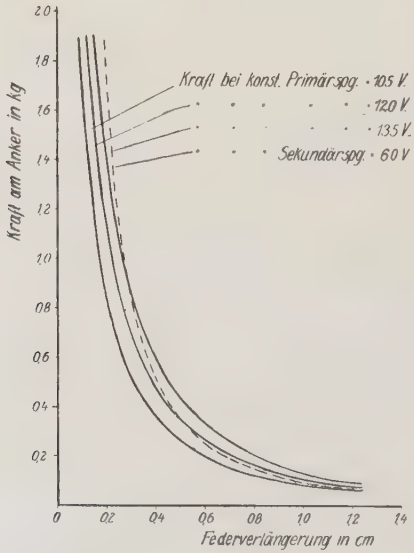

Abb. 5. Berechnete Kraft-Weg-Funktionen, die unter verschiedenen Bedingungen für den beweglichen Anker gelten

diesen berechneten Kraftverlauf wieder. Es ist hierbei $l_1 = 0{,}4$ cm angenommen. P′ ist für die Netzspannungen u = 105, 120 und 135 Volt, P für die Spannung $e_1 = 60$ Volt eingetragen.

Zur Kontrolle dieser Werte wurde die am Anker wirkende Kraft außerdem experimentell ermittelt. Die Messung wurde in der Weise ausgeführt, daß bei angelegter Spannung Abstandsstücke von bestimmter Dicke zwischen Anker und Kern gelegt wurden. Geeignete geeichte Federn wurden einerseits am Haken des Ankers und andererseits an einer Spindel, die durch eine Mutter verschoben werden konnte, befestigt. Durch Drehen der Mutter wurde die Feder solange gespannt, bis die Kraft groß genug war, die Anziehungskraft zu überwinden und den Anker zurückschnellen zu lassen. Aus der jeweiligen Federverlängerung im Augenblick des Zurückschnellens und aus der Eichkurve der Feder ergibt sich unter Berücksichtigung der Horizontalkomponente des Gewichtes des drehbar gelagerten Ankers die Anziehungskraft.

Das Ergebnis der Messungen ist in Tabelle 2 wiedergegeben. In Spalte 1 ist der Ankerabstand eingetragen, bei dem bei einer bestimmten Federspannung der Anker zurückschnellt. Spalte 2 gibt die aus den Federeichkurven abgelesenen Werte der Federkraft bei dieser Verlängerung an. Die oben erwähnte zu subtrahierende horizontale Kraftkomponente des Ankergewichtes ist aus Spalte 3 ersichtlich. Spalte 4 endlich zeigt die sich aus Spalte 2 und 3 ergebende Anziehungskraft.

Zu dieser Methode ist noch zu bemerken, daß die Kraftmessung insbesondere bei kleinen Ankerabständen nur ungenaue Werte ergibt. Infolge auftretenden starken Zitterns des Ankers kann die Messung der zu einem bestimmten Abstand gehörigen Kraft nicht mit der gewünschten Genauigkeit durchgeführt werden und auch der Abstand selbst ist nicht genau definierbar. Die Messung wird bei sehr kleinen Abständen überhaupt unmöglich.

Wie leicht einzusehen ist, ergeben sich daher bei dieser Methode zu niedrige Werte der Anziehungskraft, die insbeson-

Tabelle 2

Ankerabstand $l_1 = 0{,}4$ cm

1 Ankerabstand l_2 in cm	2 Federkraft in kg	3 Gewichtskomponente des Ankers in kg	4 Anziehungskraft experimentell in kg
	1. Konstante Primärspannung.		
	a) u = 105 Volt		
0,45	0,43	0,05	0,38
0,6	0,22	0,04	0,18
1,2	0,07	0	0,07
	b) u = 120 Volt		
0,15	1,17	0,07	1,10
0,3	0,61	0,06	0,55
0,6	0,26	0,04	0,22
	c) u = 135 Volt		
0,45	0,58	0,05	0,53
0,6	0,35	0,04	0,31
1,2	0,09	0	0,09
	2. Konstante Sekundärspannung.		
	$e_1 = 60$ Volt		
0,25	0,88	0,07	0,81
0,35	0,61	0,06	0,55
0,6	0,26	0,04	0,22
1,2	0,05	0	0,05

dere bei kleinen Ankerabständen mit beträchtlichen Fehlern behaftet sind. Die gemessenen Werte ergeben aber immerhin eine befriedigende Übereinstimmung mit den berechneten Werten, wie der Vergleich der in Tabelle 2 Spalte 4 eingetragenen Werte mit den berechneten Kurven in Abb. 5 zeigt.

11. Der selbsttätig regelnde Transformator und seine praktische Brauchbarkeit.

Nachdem die für die Regelung wichtigen Verhältnisse geklärt sind, handelt es sich darum, eine Anordnung zu entwickeln, die es gestattet, einen Kraftverlauf, wie er durch (17a) vorgeschrieben wird, zu verifizieren.

Es besteht die Möglichkeit, diesen Kraftverlauf durch Leitkurven- oder Kniehebel-Übertragungen zu erhalten. Im vorliegenden Falle wurde jedoch eine andere Methode gewählt. Abb. 4 zeigt den Transformator mit der betreffenden Anordnung. Ein Stahldraht 132 ist befestigt bei den Punkten 1 und 2. In 1 greift der Draht am Haken Ha des Ankers A_2 an. Ein zweiter Draht 354, der einerseits im Punkte 4 befestigt ist, greift andererseits in 3 am erstgenannten Draht an. Eine im Punkt 6 angebrachte Feder F ist nun ihrerseits im Punkt 5 am letztgenannten Draht befestigt. Durch besondere Vorrichtungen ist es möglich, die Länge der Drähte 354 und 132 bei den Punkten 2 und 4 zu verändern. Die Federspannung bzw. die Lage des Punktes 6 konnte ebenfalls mittels Spindel und Mutter variiert werden. Die Drahtbefestigungsanordnungen waren ihrerseits auf einem starken Gestell Ge montiert, das auf das Grundbrett GB geschraubt war. Es zeigte sich, daß es möglich ist, durch die verschiedensten Kombinationen der Federspannungen bzw. Drahtlängen den gewünschten Kraftverlauf zu erhalten.

Mit der so beschriebenen Anordnung ist beispielsweise eine selbsttätige Regelung erreicht worden, derart, daß bei einer primären Spannungsschwankung zwischen 105 und 135 Volt eine sekundäre Spannungsschwankung von weniger als 3 % auftrat. Ein Nachteil der beschriebenen Anordnung war der Umstand, daß die Werte der Sekundärspannung bei steigender und fallender Netzspannung verschiedene Größe hatten, daß also die Regelkurve eine hysteresisartige Schleife darstellte. Diese Tatsache war auf die nicht zu vermeidenden Lagerreibungen und andere Energieverluste bei der Einstellung des Ankers zurückzuführen. Es ist eine bestimmte Mindest-

kraft und mithin eine bestimmte Mindestspannungsschwankung erforderlich, um die Reibungskräfte zu überwinden und den Anker in Bewegung zu setzen. Es sei zunächst angenommen, die auf die Anker wirkenden Kräfte befinden sich im Gleichgewicht. Dann ist bei einer auftretenden Spannungsschwankung und noch nicht veränderter Ankerlage die auftretende Kraft

$$dP' = \left(\frac{\partial P'}{\partial k}\right)_{l_2} d\,k$$

oder nach Ausführen der Differentiation

$$d\,P' = -\frac{k\,\Phi^2}{2}\left(\frac{1}{\frac{w_2}{w_1}+1}\right)^2 \frac{d\,w_2}{d\,l_2}\; d\,k$$

Man erkennt aus dieser Gleichung, daß die zur Verfügung stehende Regelkraft $d\,P'$ bei einer bestimmten Spannungsschwankung mit größer werdendem l_2 abnimmt. Das hat zur Folge, daß bei größerem Abstand des Ankers A_2 die Regelung schlechter wird, da ein wesentlich höherer prozentualer Betrag, der zur Verfügung stehenden Regelkraft für die Ueberwindung der Reibung bei der Ankereinstellung aufzubringen ist. Die Ankereinstellung wird dann ungenauer. Vom Gesichtspunkt einer exakten Ankereinstellung betrachtet, ist es wünschenswert, die Normalstellung des Ankers A_2 so zu wählen, daß der Abstand l_2 möglichst klein wird. Es läßt sich leicht zeigen, daß diese Forderung bedeutet, daß der Flußverteilungsfaktor γ einen hohen Wert annehmen muß. Und weiterhin läßt sich infolgedessen ein Mindestwert des Flusses γ angeben, der gewählt werden muß, um eine vorgeschriebene Genauigkeit der Regelung zu erreichen. Es ist auf diese Weise der in Kap. 4 unter Punkt 2 erwähnte Mindestwert des Flusses festgelegt.

Eine Forderung, die man weiterhin an den Transformator stellen muß, ist die, daß er keine allzu hohe Empfindlichkeit gegen eine geringe durch irgendwelche Ursachen bedingte ungenaue Ankereinstellung oder gegen Erschütterungen oder

gegen aus sonstigen Gründen auftretende ungewollte Ankerbewegungen haben soll. Die bei einer unbeabsichtigten falschen Einstellung l_2 des Ankers auftretende sekundäre Spannungsschwankung hängt ab von der Schwankung des Flusses Φ_1. Diese ist gegeben durch den Ausdruck

$$d\,\Phi_1 = \left(\frac{\partial\,\Phi_1}{\partial\,l_2}\right)_k d\,l_2$$

Hieraus ergibt sich nach Einführen des Wertes für e_1 und nach der Differentation

$$d\,\Phi_1 = \frac{k\,\Phi_N\,w_1}{(w_1 + w_2)^2} \cdot \frac{\partial\,w_2}{\partial\,l_2}\,d\,l_2$$

Die sekundäre Spannungsschwankung wird hiernach für große Werte von l_2 am kleinsten. Für einen vorgeschriebenen Höchstwert einer solchen Schwankung bei einer ungenauen Ankereinstellung ergibt sich somit ein Mindestwert des Ankerabstandes. Damit ist auch ein Höchstwert des Flusses nach Kap. 4 Punkt 2 verbunden und ein Höchstwert von γ, der nach Möglichkeit nicht erreicht werden soll.

Die Forderung nach exakter Regelung bezw. Ankereinstellung und die Forderung nach einer gewissen Unempfindlichkeit gegenüber ungenauer Ankereinstellung ergeben gegensätzliche Bedingungen für die Größe des Flußverteilungsfaktors γ.

Was die Höhe des Flusses Φ_2 anlangt, so ist es aus Gründen der exakten Ankereinstellung zweckmäßig, den Mindestwert des Flusses ziemlich hoch zu wählen, während die erwähnte Unempfindlichkeit eine möglichst niedere Wahl des Höchstwertes des Flusses erfordert. Wenn bestimmte Zahlenwerte für den Mindestbetrag von $\frac{d\,P'}{d\,k}$ und für den Höchstwert von $\frac{d\,\Phi_1}{d\,l_2}$ nicht gegeben sind, wird man zweckmäßigerweise ein Optimum zu finden suchen, das beiden Forderungen gerecht wird. Aus diesem Grunde wurde für den Streufluß

gemäß den Ergebnissen der diesbezüglich ausgeführten Versuche dieselbe Größe wie für den Fluß, der die Sekundärspannung erzeugt, gewählt. γ hat dann den Wert 2.

Es bietet große Schwierigkeiten, den Kraftverlauf, wie er in (17a) gefordert ist, nach der beschriebenen Methode zu realisieren. Es werden schwer zu erfüllende Ansprüche an das zu verwendende Material gestellt. Wegen der sehr kleinen Kräfte bei größeren Ankerentfernungen kann der Durchmesser der Stahldrähte nicht groß gewählt werden. Andererseits sind die Beanspruchungen des Drahtes bei kleinen Ankerentfernungen sehr hoch und die Gefahr des Zerreißens ist groß. Aus diesem Grunde ist es wünschenswert, eine günstigere Methode der Regelung anzuwenden.

12. Ein Transformator mit einer verbesserten selbsttätigen Regelung.

Eine Methode, bei der ein linearer Verlauf der magnetischen Anziehungskraft erzielbar ist, wo also Federn innerhalb ihres Elastizitätsbereiches zur Erzeugung der Gegenkraft benutzt werden, wäre eine günstigere Lösung, denn es würden die im vorausgehenden Kapitel angeführten Mängel nicht auftreten.

Ein derartiger Verlauf der Anziehungskraft läßt sich erreichen, wenn man den Anker nicht vor den Jochen hin- und herpendeln läßt, sondern wenn er sich zwischen den Jochen bewegt und wenn er außerdem eine bestimmte Form hat. Diese läßt sich nicht exakt berechnen. Es wurde daher der Weg beschritten, an einem hierfür angefertigten Transformator diese Form experimentell zu ermitteln.

Den Aufbau eines solchen Transformators zeigt Abb. 6. Auf zwei U-Schienen US von 44 cm Länge sitzt je eine starke Pertinaxplatte P_1. Beide Platten tragen die an Winkeln befes-

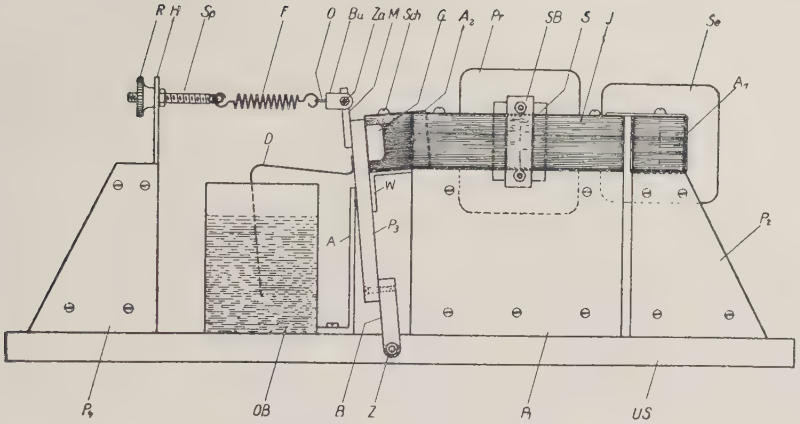

Abb. 6. Eine verbesserte Ausführung
des Regeltransformators mit linearer Gegenkraft

A Anschlagwinkel für bewegliches System, A_1 feststehender Anker, A_2 beweglicher Anker, B Tragbügel des beweglichen Systems, Bu Federkraft-Übertragungsbügel, D Dämpfungsflügel, F Feder, G Gummipuffer, H Spindelhalterung, J Joche des Transformatorkernes, K Kern des Transformators, M Metallplättchen, O Öse am Bügel Bu, OB Ölbehälter, P_1, P_2 und P_4 Pertinaxplattenpaar, P_3 Pertinaxplatte des beweglichen Systems, Pr Primärspule, R Rändelmutter an der Spindel, S Säule des Transformatorkernes, Sch Befestigungsschraube des beweglichen Ankers A_2, Se Sekundärspule, Sp Spindel, US U-Schienen, Z Lagerzapfen im Tragbügel B, Za Lagerzapfen im Bügel Bu

tigten Joche J. Die mittlere Säule S des Kernes K mit der Primärspule Pr wird vermittels zweier Schraubenbolzen zwischen die Joche geklemmt. Zwei weitere Pertinaxplatten P_2 sind verschiebbar auf den U-Schienen befestigt. Auf ihnen ist der für den festeinstellbaren Luftspalt vorgesehene Anker A_1 angebracht. Dieser Anker trägt die Sekundärspule Se. Der für den variablen Luftspalt vorgesehene Anker A_2 ist an einem beweglichen System angebracht, das in den U-Schienen drehbar gelagert ist. Es besteht aus einer Pertinaxplatte P_3 und einem eisernen Tragbügel B mit den Lagerzapfen Z. Am oberen Ende der Pertinaxplatte sind befestigt erstens der Anker A_2

und zweitens eine drehbare Lagerung für die hier angreifende Feder F. Wegen der experimentell zu ermittelnden Form des Ankers A_2 ist es notwendig, denselben so anzubringen, daß er leicht an- und abmontiert werden kann. Das wird dadurch erreicht, daß er auf einem an der Pertinaxplatte P_3 angebrachten Eisenwinkel aufgesetzt ist, auf den er von oben mittels der Schrauben Sch angeschraubt wird. Die Pertinaxplatte trägt außerdem noch einen Dämpfungsflügel D für die vorgesehene Öldämpfung. Diese soll eine aperiodische Einstellung des beweglichen Systems gewährleisten und zur Vermeidung von Schwingungen dienen. Zum Zwecke einer weitgehend reibungslosen Lagerung des Systems wird in der Weise verfahren, daß horizontal in den Eisenbügel B gehärtete Lagerzapfen eingelassen sind. Diese greifen in entsprechende ebenfalls gehärtete Pfannen, die in die U-Schienen eingeschraubt sind. Ähnlich ist die Lagerung der Anordnung zur Kraftübertragung der Feder. Zu diesem Zwecke ist an der Pertinaxplatte P_3 ein Metallplättchen M angebracht, das beiderseits zwei kegelförmige Ausbohrungen erhielt. In diese Bohrungen greifen Zapfen Za ein, die im Federkraft-Übertragungsbügel Bu eingeschraubt sind. An dem Bügel befindet sich weiterhin eine Öse O, in welche die Feder F eingehängt wird. Zur Begrenzung der Ankerbewegung sind für die größte Entfernung des Ankers vom Kern Anschlagwinkel A vorgesehen, während für die größte Nähe zwei Gummipuffer G an der Pertinaxplatte P_3 sitzen. Der Dämpfungsflügel D taucht in einen Behälter OB, der als Dämpfungsflüssigkeit ein dickflüssiges Öl enthält. Die U-Schienen tragen außerdem noch ein weiteres Pertinaxplattenpaar P_4, an dem eine Halterung H für eine Spindel Sp montiert ist. Die Spindel dient zur Befestigung der Feder F, und zwar wird in eine Bohrung der Spindel ein Ende der Feder eingehängt. Die Federspannung kann durch Verschieben der Spindel in ihrer Halterung mittels der Rändelmutter R auf den günstigsten Wert eingestellt werden. Die Hauptdaten des Transformators werden im Folgenden wiedergegeben:

Netznennspannung		120 Volt
Fluß bei Nennspannung	(Scheitelwert)	90 000 Maxwell
Induktion (Scheitelwert)	i. d. mittl. Säule	11 500 Gauß
Primärwicklung:	Windungszahl	600
	Cu-Draht Durchm.	0,8 mm
Sekundärwicklung:	Windungszahl	20 000
	Cu-Draht Durchm.	0,1 mm
Mittelsäule:	Querschnitt	30×29 mm
	Länge	40 mm
Joche:	Querschnitt	30×29 mm
	Länge	115 mm
Anker A_1:	Querschnitt	30×29 mm
	Länge	98 mm
Anker A_2:	Querschnitt i. d. Mitte	30×34 mm
	Regelweg	1,8 cm
Feder:	Stahldraht Durchm.	0,7 mm
	Windungszahl	60
	Wdgs.-Außen-Durchm.	7,5 mm
	Kraftändg. bei Verlängerung ca.	0,14 kg / cm.

Die für die Regelung gefundene günstigste Form des zwischen den Jochen sich bewegenden Ankers A_2 wird in seiner Aufsicht in Abb. 7 wiedergegeben. Die Regelung kann, abge-

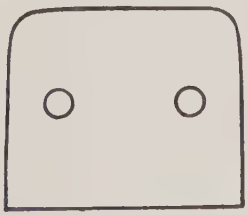

Abb. 7. Form des beweglichen Ankers, des in Abb. 6 gezeigten Transformators (von oben)

sehen vom Einfluß der Lagerreibung, durch die richtige Formgebung des Ankers A_2 auf eine beliebige Genauigkeit gebracht werden.

Der Transformator ist derart eingerichtet, daß man die Sekundärspule auswechseln kann. Die zuerst verwandte Spule lieferte eine Sekundärspannung von 1200 Volt; eine später benutzte Spule erzeugte etwa 4500 Volt. Um die Möglichkeit zu

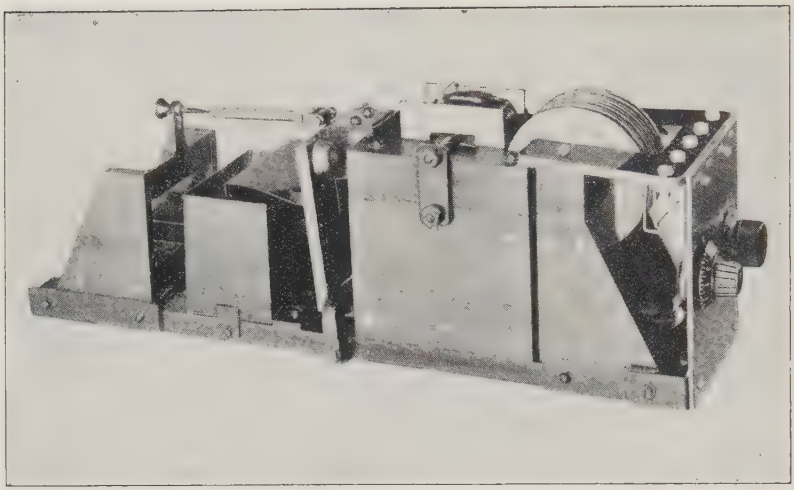

Abb. 8. Ansicht des Regeltransformators

haben, die Sekundärspannung in weiten Grenzen fein einstellen zu können, wurde außerdem eine besondere Zusatzeinrichtung angebracht, die Steckbuchsen, Stufenschalter und Potentiometer trägt. Abb. 8 stellt den in dieser Weise aufgebauten Transformator in der Ansicht dar.

13. Messungen an diesem Transformator.

An dem im vorhergehenden Paragraphen beschriebenen Transformator wurden verschiedene Messungen vorgenommen, und zwar unter Verwendung der 1200-Volt-Spule. Als Beispiel einer aufgenommenen Regelkurve wird Abb. 9 gebracht. Die Sekundärspannung ist dort als Funktion der Primärspannung dargestellt. Hierzu ist noch zu bemerken, daß die durch die Kurven wiedergegebene Messung mit einer Ankerform ausgeführt wurde, die nicht den besterreichbaren Fall darstellt. Die Spannungsschwankung beträgt jedoch nur wenige Promille.

Bei dem Verwendungszweck, für den der Transformator vorgesehen ist, kommt eine nennenswerte Belastung nicht in Frage. Er kann aber trotzdem auch für höhere Belastungen benutzt werden. Das Verhalten des Transformators bei Belastung wurde ebenfalls untersucht. Es ist selbstverständlich, daß bei veränderter Belastung die sekundäre Klemmspannung

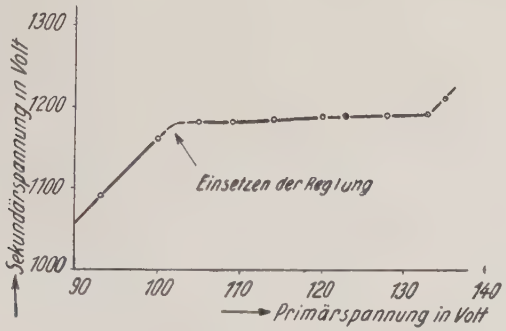

Abb. 9. Eine bei der Feststellung der günstigsten Ankerform aufgenommene Regelkurve

sich ändert. Es ergab sich, daß es bei verschiedenen Belastungen praktisch möglich ist, mit der gleichen Form des Ankers und mit derselben Feder Spannungskonstanz zu erreichen. Damit der Transformator innerhalb desselben Spannungsbereiches regelt, ist es jedoch notwendig, der Feder bei den verschiedenen Belastungen eine verschiedene Vorspannung zu erteilen. Die hierbei auftretenden Verhältnisse sollen nicht näher erörtert werden.

Für die praktische Anwendung des Transformators ist es außerdem wichtig, seine Einstellzeit nach aufgetretenen Spannungsschwankungen zu kennen. Um die Einstellzeit möglichst niedrig zu halten, wurde die beschriebene Öldämpfung verwandt. Ohne diese Öldämpfung kam der Anker erst nach einigen Schwingungen um die Gleichgewichtslage zur Ruhe. Außerdem geriet das bewegliche System infolge der schwachen

Dämpfung oft bei geringen Anlässen in Eigenschwingung. Um diese Nachteile zu vermeiden, wurde die Öldämpfung verwandt. Das Öl wurde so hoch in den Behälter gefüllt, daß sich das bewegliche System bei Spannungsschwankungen aperiodisch einstellte.

Weitere Messungen wurden vorgenommen mit dem Regeltransformator als Spannungsquelle an Ventil-Kondensator-Schaltungen. Es wurden ebenfalls Regelkurven aufgenommen. Dieselben hatten die gleiche charakteristische Form wie diejenige der Abb. 9.

Mit einer Kompensationsschaltung, die im Prinzip in Abb. 10 wiedergegeben wird, wurden außerdem Registrierungen ausgeführt. Die von dem Ventil Ve gleichgerichtete Trans-

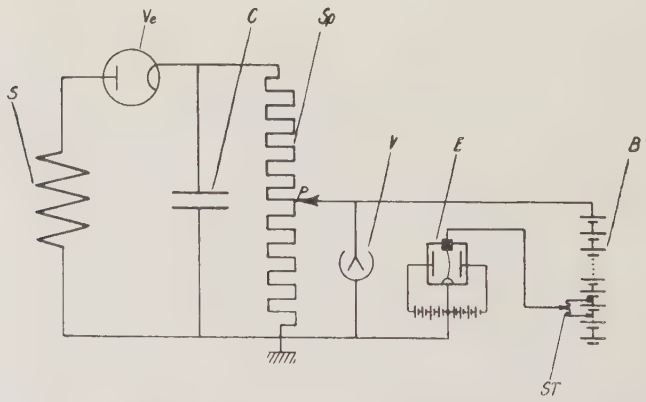

Abb. 10. Kompensationsschaltung, mit deren Hilfe die Vorgänge am Transformator registriert wurden

formatorspannung, die der Sekundärseite S des Regeltransformators entnommen wird, liegt an dem Ladekondensator C. Ein Bruchteil dieser Spannung, der bei P am Spannungsteiler Sp abgegriffen wird, wird einer gleichgroßen Spannung ent-

gegengeschaltet, die einer Anodenbatterie B entnommen ist. Als Kompensationsinstrument dient zur Grobeinstellung zunächst ein statisches Voltmeter, das alsdann durch ein Lutz-Edelmann-Elektrometer E ersetzt wird. Der Spannungsteiler ST dient dabei zur Feineinstellung der Kompensationsspannung. Er liegt jeweils an zwei aufeinanderfolgenden Steckbuchsen der Anodenbatterie. Die Kompensationsspannung wird mittels eines statischen Voltmeters V festgestellt. Aus ihrer Größe und dem Spannungsteilerverhältnis wird die Gesamtspannung ermittelt. Spannungsunterschiede oder Spannungsschwankungen am Meßspannungsteiler, die das Elektrometer anzeigt, werden durch Projektion des Elektrometerfadens auf einem Registrierstreifen festgehalten.

Im einzelnen ist folgendes zu erwähnen. Wenn man Spannungsschwankungen des Transformators verfolgen will, so muß dem Ladekondensator die Möglichkeit einer Entladung beispielsweise über einen Parallelwiderstand geboten sein. Es ist nun zu beachten, daß die Zeitkonstante von Ladekondensator und Belastungswiderstand nicht zu klein ist, um ein starkes Durchkommen der Netzfrequenz zu verhindern. Andererseits darf sie nicht zu hoch gewählt werden, da sonst bei auftretender Spannungserniedrigung am Transformator die Spannung am Ladekondensator nicht schnell genug folgt. Die gewählte Zeitkonstante ist 1,4 Sekunden; entsprechend einer Kapazität von 16 000 cm und einem Widerstand von 97 MΩ. Es ist außerdem noch ein Siebwiderstand parallel zum Registrierelektrometer geschaltet. Als Ladekondensatoren dienen Minos-Platten-Kondensatoren. Als Belastungswiderstand wurde ein Meßspannungsteiler verwandt.

Die Versuchsanordnung zur Registrierung wird durch Abb. 11 veranschaulicht. Die hinter dem Elektrometer E befindliche Lichtquelle L war so aufgestellt, daß ihr Licht durch das Elektrometer fiel, um durch das Okularrohr wieder auszutreten. Die jeweilige Stellung bezw. die Bewegung des Elektrometerfadens wurde mittels eines Projektionsokulars O in einer Registrierapparatur R abgebildet. Die Registrierung ge-

schah in der Weise, daß das ankommende Licht durch eine in der Vorderwand des Registrierapparates befindliche Zylinderlinse Z fiel und die photographische Schicht des vorbeilaufenden Registrierpapiers P belichtete. Die Zylinderlinse gestattete es, bei guter zeitlicher Auflösung bzw. Registriergeschwindigkeit eine verhältnismäßig hohe Lichtintensität für die Belichtung zu erzielen. Die Geschwindigkeit des Registrierpapiers wurde durch Übersetzungen und durch Drehzähländerungen des Antriebmotors Mo variiert. Zum Herstellen von Zeitmarken, die bei verschiedenen Registrierungen benötigt

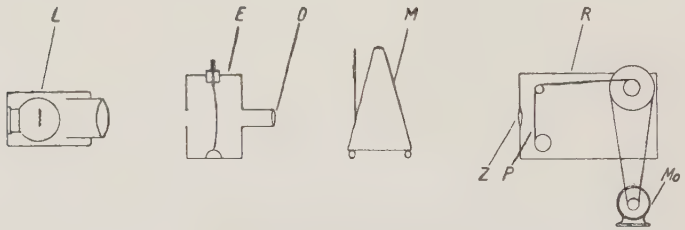

Abb. 11. Aufbau der Registrierapparatur

wurden, diente ein Metronom M, das am Ende seines Pendels eine Papierfahne trug. Das Metronom war so aufgestellt, daß seine Papierfahne beim größten Ausschlag des Pendels einen Teil des Lichtbündels, das in den Registrierapparat fiel, abdeckte. Hierdurch entstanden in bestimmten Abständen schmale Streifen auf dem Registrierpapier, die der Schwingungsdauer des Pendels entsprechen.

Bei der Registrierung wurden zunächst auf dem Registrierstreifen Spannungseichmarken aufgenommen. Die an das Elektrometer gelegte und zu registrierende Eichspannung wurde über ein Potentiometer einem Akkumulator entnommen und mit einem Voltmeter gemessen. Sodann wurde die am Punkt P (Abb. 10) auftretende Spannung durch die Anodenbatterie B kompensiert und die beabsichtigte Registrierung

durchgeführt. Die Registrierung wurde in mehrfacher Hinsicht unternommen. Die Bedeutung und die Ergebnisse zweier solcher Aufnahmen werden als Beispiel im Folgenden erläutert und in der Abb. 12 wiedergegeben.

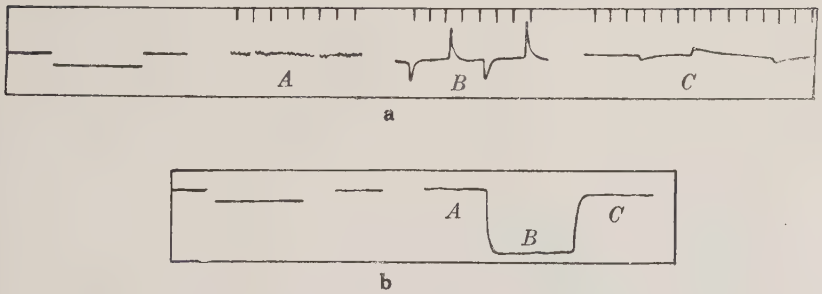

Abb. 12. Aufgenommene Registrierkurven

Abb. 12a zeigt die Regelwirkung des Transformators, indem die Spannung bei regelndem und nichtregelndem Anker aufgenommen ist. Die Kurve zeigt folgendes: Im ersten Teil A ist die Einstellung des Elektrometerfadens bei einer bestimmten Spannung zu sehen. Alsdann folgt im Teil B eine starke Vertiefung. Diese stellt den sekundären Spannungsrückgang dar, der bei Erniedrigung der Primärspannung um einen bestimmten Betrag bei arretiertem Anker des Transformators auftritt. Der Wiederanstieg der Kurve in Teil C stellt sich ein nach erfolgter Entarretierung des Ankers. Dieser nimmt daraufhin seine Gleichgewichtslage ein. Das Ergebnis ist die in der Kurve sich zeigende Regelwirkung. Bei der Registrierung wurde eine Spannungserniedrigung auf der Primärseite vorgenommen von 126 auf 120 Volt. Die Eichmarken, die sich links von der Kurve befinden, wurden bei einer Eichspannung von 1 Volt erhalten. Die Kompensationsspannung betrug 131 Volt. Das Verhältnis von abgegriffenem zum Gesamtwiderstand des Spannungsteilers verhält sich wie 7:97. Die Gesamtspanung beträgt demnach etwa 1820 Volt und der Abstand der

Eichmarken entspricht einer Spannung am Ladekondensator von etwa 13,9 Volt. In der Kurve der Abb. 12a ist also ein Spannungsausgleich von etwa 82 Volt erreicht worden.

Die Bedeutung der in Abb. 12b gezeigten Registrierung wird im Folgenden dargelegt. Der Anker benötigt infolge seiner Massenträgheit eine bestimmte Zeit zu seiner Einstellung. Spannungsschwankungen, die von kürzerer Dauer sind als die Einstellzeit, werden also nur teilweise oder überhaupt nicht geregelt. In Schaltungen, wo sehr kurze Spannungsschwankungen nicht von Bedeutung sind, beispielsweise bei der Verwendung eines solchen Transforamtors zur Heizung von Röhren in Meßschaltungen, kann der Transformator ohne besondere Hilfsmaßnahmen verwandt werden. In einer Ventil-Kondensator-Schaltung können diese noch auf die Sekundärseite durchkommenden Schwankungen mittels eines Siebgliedes unterdrückt werden. Die Zeitkonstante dieses Siebgliedes muß höher liegen als die Einstellzeit des Transformators, und zwar richtet sie sich nach der sekundärseitig noch zugelassenen Spannungsschwankung. Zur Orientierung über die Größe der registrierten Spannungen ist zu sagen, daß die gleichen Daten gelten wie bei Abb. 12a. Die Zeitmarken entsprechen einer Zeitdauer von 2 Sekunden. Bei der Aufnahme des Teiles A der Kurve wurde der Siebkondensator so klein gewählt, daß die kurzdauernden Spannungsschwankungen des Netzes noch durchkamen. Es wurden außerdem in Zeitabständen von einigen Sekunden Spannungsstöße, die im Vergleich zur Einstellzeit kurzdauernd waren, auf den Transformator gegeben, und zwar von 115 auf 127,5 Volt und von 127,5 auf den ursprünglichen Wert zurück. Die Zeit vom Einsatz des Spannungsstoßes bis zur Einstellung des Transformators ist in der Registrierkurve durch eine Lücke gekennzeichnet, denn die plötzliche Spannungsänderung ist so groß, daß die Lichtmarke nicht mehr auf dem Registrierstreifen verläuft. Das Wiedereinsetzen der Kurve bedeutet die erfolgte Einstellung des Ankers in seine neue Lage. Die Dauer der Unterbrechung der Kurve ist also die Einstellzeit des Transformators.

Ihr Mittelwert aus den Registrierungen ergibt sich zu etwa 0,45 sec. Die Wirkung größerer Siebkondensatoren, und zwar von 0,04 bzw. 0,25 μF ist aus den Teilen B bezw. C der Abbildung zu ersehen. Die kurzdauernden, unterhalb der Regelzeit liegenden Schwankungen sind ganz unterdrückt. Die künstlich erzeugten Spannungsstöße, die von längerer Dauer als die Regelzeit sind, sind bedeutend abgeflacht. Man hat es also durch geeignete Wahl des Siebgliedes in der Hand, die infolge der Einstelldauer des Ankers noch auftretenden Spannungsstöße weitgehend zu unterdrücken, so daß sie praktisch keine Rolle spielen.

Man ist somit in der Lage, mit derartigen Transformatoren in einer Ventil-Kondensator-Schaltung in Verbindung mit geeignet gewähltem Siebglied nahezu konstante Gleichspannung in der Größenordnung von einigen tausend Volt zu erzeugen.

Sein Verwendungsbereich ist jedoch nicht auf diesen Zweck beschränkt. Er kann auch zur Entnahme größerer Leistungen benutzt werden.

Zusammenfassung.

Es werden Methoden der Spannungsregelung betrachtet und ein für diese Zwecke vorgesehenes neuartiges Verfahren angegeben, das sich eines Regeltransformators bedient. Bei diesem Transformator wird der primäre Fluß aufgeteilt, und zwar in einen Anteil von konstanter Größe, der die sekundäre Spannung erzeugt und einen weiteren Anteil, der die Flußschwankungen infolge der primären Netzspannungsschwankungen aufnimmt. Das geschieht in der Weise, daß der letztere Flußzweig variablen magnetischen Widerstand hat. Der jeweilige Widerstand wird durch einen Anker, der sich vor dem Kern bewegt, selbsttätig eingestellt. Die Regelmöglichkeit mittels dieses Transformators ist praktisch durch verschiedene Umstände begrenzt, so durch die minimal und maximal an-

wendbaren Flüsse und durch die Grenzen der einstellbaren magnetischen Widerstände. Betrachtungen über die günstigste Flußausnutzung einerseits und über die Erreichung eines größtmöglichen Regelbereiches andererseits ergeben gegensätzliche Forderungen hinsichtlich der Aufteilung des Gesamtflusses in die beiden Teilzweige. Es werden die den Regelvorgang beschreibenden Gleichungen aufgestellt und die in diesen Gleichungen auftretenden Konstanten und Koeffizienten für einen Versuchstransformator ermittelt. Die selbsttätige Regelung geschieht unter Ausnutzung der Anziehungskraft, die auf den Anker wirkt und einer geeigneten ebenfalls am Anker angreifenden Gegenkraft. Es werden Gleichungen abgeleitet, die es gestatten, diese Anziehungskraft aus den ermittelten Meßwerten des Transformators zu berechnen. Die Anziehungskraft wird außerdem an dem für diese Zwecke abgeänderten Versuchstransformator experimentell festgestellt. Die erforderliche Gegenkraft wurde zunächst bei einem nach obigen Gesichtspunkten ausgeführten Regeltransformator durch eine Feder und ein aus Stahldrähten bestehendes Kraftübersetzungssystem hergestellt. Verschiedene Mängel dieser Methode gaben Veranlassung zu einer weiteren Ausführungsform des Transformators. Die Form des Ankers wurde hierbei derart gewählt, daß die Gegenkraft linear mit dem Ankerabstand abnimmt. An diesem Transformator wurden Messungen und Registrierungen vorgenommen und seine Verwendbarkeit zur Erzeugung konstanter Spannungen gezeigt.

SCHRIFTTUM.

1) E. Pugno-Vanoni, Elettrotecnica **16** (1929) 339;
2) J. C. Street u. Th. H. Johnson, Journ. Franklin Inst. **214** (1932) 155;
3) G. Medicus, ZS. techn. Phys. **14** (1933) 304;
4) L. A. Richards, Rev. Sc. Instr. **4** (1933) 479;
5) E. Wilhelmy, Strahlenth. **44** (1932) 168;
6) W. Geyger, A.T.M. (1934) I 062—5,6,7 und 8;
7) O. H. A. Schmitt, Rev. Sc. Instr. **5** (1934) 435;
8) E. Friedländer, Siemens-ZS. **15** (1935) 177;
9) W. Geyger, Siemens-ZS. **15** (1935) 464;
10) R. Greiner, E. T. Z. **57** (1936) 489;
11) G. Keinath, Techn. Messg. München 1928, I. 456;
12) L. Körös u. R. Seidelbach, Elektr. Nachrichtenw. **12** (1934) 75.

Vorliegende Arbeit wurde im Institut für Physikalische Grundlagen der Medizin der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität zu Frankfurt a. M. in den Jahren 1935 bis 1937 ausgeführt.

Herrn Prof. Dr. B. Rajewsky, der mir die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte, möchte ich auch an dieser Stelle herzlichst danken.

Lebenslauf.

Ich, Hans Beck, Sohn des techn. Reichsbahninspektors Wilhelm Beck und dessen Ehefrau Magdalene, geb. Schowalter, bin am 2. April 1907 zu Darmstadt geboren. Ostern 1913 wurde ich in die Volksschule Bischofsheim b. Mainz aufgenommen. 1917 trat ich in die Oberrealschule zu Mainz ein, woselbst ich Ostern 1926 die Reifeprüfung ablegte. Nach halbjähriger praktischer Tätigkeit widmete ich mich von Herbst 1926 bis Herbst 1933 dem Studium der Physik an der Techn. Hochschule Darmstadt, den Universitäten Frankfurt a. M. und Wien. Seit 1932 arbeite ich an dem damaligen Universitätsinstitut für Physikalische Grundlagen der Medizin und jetzigen Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik. Ich habe mich an verschiedenen Untersuchungen des Instituts beteiligt und während dieser Zeit zwei Arbeiten veröffentlicht.